

**DISEÑO DE UNA CAMARA ANECOICA PARA EL LABORATORIO DE VIBRACIONES Y
ACÚSTICA (LAVA) DE LA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA DE UNIVALLE
(EIME UNIVALLE)**



ALEJANDRO ORREGO GONZÁLEZ

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2015**

**DISEÑO DE UNA CAMARA ANECOICA PARA EL LABORATORIO DE VIBRACIONES Y
ACÚSTICA (LAVA) DE LA ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA DE UNIVALLE
(EIME - UNIVALLE)**

ALEJANDRO ORREGO GONZÁLEZ

Proyecto de Grado de Pregrado en Ingeniería Mecánica

Director

Joao Luis Ealo Cuello

Ingeniero Mecánico, Ph.D.

Codirector

Jhon Fernando Pazos

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2015**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Santiago de Cali,

Dedicatoria

Este trabajo lo ofrezco a Dios en acción de gracias por hacerlo posible, a mis Padres y a mi Tía Gloria por su gran amor. A mis abuelos Toto, Emi, Pacho y Amparo por ser los pilares de mi familia, por alumbrar siempre nuestros caminos. A mi hermano Juan Fernando González rogando a Dios por su pronto regreso. A mis hermanos y familia por estar siempre a mi lado. A Patricia Durán por apoyarme emocionalmente y con su trabajo. A mis amigos de laboratorio. Al profe Joao, a Jhon, a Fernando, a David y a Rubén por su apoyo académico.

Agradecimientos

A Dios infinitas gracias por su amor.

A mis Padres y Tía Gloria por todo su apoyo.

A mis hermanos y familia por estar siempre conmigo.

Al profesor Joao Ealo Cuello por brindarme la oportunidad y el apoyo para sacar este proyecto adelante.

A mis compañeros del Laboratorio de Vibraciones y Acústica de Univalle, Jhon, Fernando, Diego, David, Rubén, Carlos y Alfonso por brindarme su amistad.

A Patricia Durán por su ayuda en la construcción de la cámara y su incondicional compañía.

A Cristian, Mily, Waldo, Alejandra, Hector, Lina, Wilmer y todos mis amigos por estar conmigo en todas.

A los profesores que me formaron académica y moralmente.

A todos quienes con su granito de arena hicieron parte de este sueño.

Contenido

Listado de Figuras	8
Listado de Tablas	10
RESUMEN	11
INTRODUCCION	12
1. ANTECEDENTES	16
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1. El sonido.....	21
2.1.1. Bandas en frecuencia de octavas y de tercio de octavas.....	22
2.2. El ruido	24
2.2.1. Caracterización del ruido en el tiempo.....	24
2.2.2. Caracterización del ruido en frecuencia.....	24
2.2.3. Caracterización del ruido según la forma en que se propaga	24
2.3. Aislamiento del ruido	25
2.3.1. Aislamiento del ruido aéreo.....	25
2.3.2. Aislamiento a ruido de vibraciones	27
2.4. Acústica de salas	28
2.4.1. Tiempo de reverberación (TR)	28
2.4.2. Modos propios de un recinto	30
2.5. Ley del Inverso Cuadrado	31
2.6. Cámaras anecoicas	31
2.6.1. Dimensionamiento de una cámara anecoica	33
2.6.2. Cuñas anecoicas.....	33
2.6.2.2. Materiales porosos como absorbentes acústicos en cuñas anecoicas	35
2.6.3. Coeficiente de absorción en materiales porosos para prestaciones acústicas	38
3. MATERIALES Y METODOS	40
3.1. Cuñas anecoicas.....	40
3.1.1. Simulación de espacio de aire y arreglo de cuñas anecoicas	40
3.1.2. Materiales propuestos para cuñas anecoicas.....	42
3.1.3. Método para la medición del coeficiente de absorción de los materiales propuestos... ..	42
3.2. Cámara anecoica	43
3.2.1. Norma ISO 3745	43
3.2.2. Mediciones acústicas	44
3.2.3. Procedimiento de calificación aplicado	48
4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA ANECOICA DEL LABORATORIO DE VIBRACIONES Y ACÚSTICA DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE CALI – COLOMBIA.	50

4.1.	Diseño del aislamiento a ruido aéreo.....	50
4.2.	Dimensionamiento de la cámara anecoica	51
4.3.	Diseño de las cuñas anecoicas.....	53
4.3.1.	Material de las cuñas anecoicas	53
4.3.2.	Dimensionamiento de las cuñas anecoicas	53
4.4.	Cálculo del tiempo de reverberación de la cámara anecoica del LaVA – Univalle.	56
4.5.	Presupuesto	57
4.6.	Construcción de la Cámara Anecoica.....	57
5.	RESULTADOS DE LA CALIFICACIÓN DE LA CÁMARA ANECOICA DEL LAVA – UNIVALLE.	60
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	66
	Bibliografía	67

Listado de Figuras.

Figura 1. Cámara anecoica del Laboratorio de Vibraciones y Acústica de Universidad del Valle (Cali – Colombia)	12
Figura 2. Cámara anecoica Universidad de Harvard. (Beranek & Sleeper, 1946) ¡Error! Marcador no definido.	17
Figura 3. Cámara anecoica con cuñas tipo Cremer. (Brüel Acoustics)	18
Figura 4. Resultados de la desviación del inverso cuadrado en la cámara anecoica de Beranek & Sleeper. (Beranek & Sleeper, 1946)	18
Figura 5. Resultados de la evaluación de la ley del inverso cuadrado en la cámara anecoica de García y Quintana para distancias de la fuente de 10, 12,5, 20 y 25 cm. (García Luque & Quinatana Soler, 2007)	18
Figura 6. Resultados de la evaluación de la ley del inverso cuadrado en la cámara anecoica de García y Quintana para distancias de la fuente de 40, 50 y 80 cm. (García Luque & Quinatana Soler, 2007)	19
Figura 7. Montaje propuesto por Gomez, Sánchez & Blanco para la calificación alternativa de una cámara anecoica. (Gomez Alfageme, Sánchez Bote, & Blanco Martín)	19
Figura 8. Montaje propuesto por Leeudomwongs, Juntarapaso, Kongthavorn, Thoongboon y Plangsaengmas para la calificación alternativa de una cámara anecoica.	20
Figura 9. Onda sonora.	21
Figura 10. Reflexión, absorción y transmisión del sonido.	25
Figura 11. Elementos para sistemas de montaje elástico sobre fundamento rígido. (Moser & Barros, 2009)	28
Figura 12. Ley inverso cuadrado. (hyperphysics.phy-astr.gsu.edu, 2014)	31
Figura 13. Partes de una cámara anecoica (UNAM – México)	32
Figura 14. Cuña anecoica tipo Cremer. (Bruel, 2003)	34
Figura 15. Cuña anecoica wedge tipo piramidal, tetraedral y exponencial. (Beranek & Sleeper, 1946)	34
Figura 16. Partes de un cuña anecoica	35
Figura 17. Especificaciones dimensionales de una cuña anecoica respecto de la frecuencia de corte. (Beranek & Sleeper, 1946)	35
Figura 18. Esquema montaje del ensayo de resistencia al flujo de aire en materiales acústicos. (Joshi, Shravage, Jain, & Karanth, 2011)	36
Figura 19. Esquema del modelo en Comsol.	41
Figura 20. Análisis de convergencia de la malla del modelo computacional.	42
Figura 21. Tubo de Kundt del LaVA - Univalle	43
Figura 22. Señal Ruido Rosa.	45
Figura 23. Espectro frecuencial de la señal Ruido Rosa.	45
Figura 24. Medición acústica en el dominio del tiempo de la señal ruido rosa.	46
Figura 25. Espectro frecuencial de la señal ruido rosa medida.	46
Figura 26. Respuesta en frecuencia del parlante Bellsound 8M300. Gráfica del fabricante.	47
Figura 27. Ubicación de la fuente y dirección de las medidas.	48
Figura 28. Cadena de emisión y recepción de la señal evaluada.	49
Figura 29. Resultados de diferencias intermodales para la cámara anecoica del LaVA – Univalle.	52
Figura 34. Dimensiones finales en mm de las cuñas anecoicas de la cámara anecoica LaVA – Univalle.	56
Figura 35. Representación del proceso de construcción de la cámara anecoica del LaVA–Univalle.	58
Figura 37. Comparativo del ruido de fondo respecto del Ruido Rosa empleado.	60

Figura 38. Desviación de la ley del inverso cuadrado en la cámara anecocia del LaVA – Univalle.	61
Figura 39. Resultados de la Ley del Inverso Cuadrado teórico y experimental para bandas de frecuencia de tercio de octavas centradas en 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz.	63
Figura 40. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 125 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.	63
Figura 41. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 250 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.	64
Figura 42. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 400 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.	64
Figura 43. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 500 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.	64
Figura 44. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 1000 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.	65
Figura 45. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 125 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.	65
Figura 46. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 4000 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.	65
Figura 47. Plano arreglo de cuñas anecoicas.	70
Figura 48. Plano estructura soporte.	71
Figura 49. Pared de cuñas anecoicas.	72
Figura 50. Plano corte transversal de cámara anecoica.	73

Listado de Tablas

Tabla 1. Frecuencias en bandas de octava y de tercio de octava.	23
Tabla 2. Evaluación acústica de paredes dobles. (Lehmann Fernandez, 2007).....	27
Tabla 3. Valores recomendados de tiempo de reverberación en distintos recintos.	30
Tabla 4. Valores de resistencia al flujo en espumas testeado por varios laboratorios. (Joshi, Shravage, Jain, & Karanth, 2011).	37
Tabla 5. Las dos medidas de tortuosidad. (Allard, Castagnede, Henry, & Lauriks, 1994).....	38
Tabla 6. Coeficientes de absorción acústica de distintos materiales.	39
Tabla 7. Máxima desviación admisible de las medidas de los niveles de presión sonora medidos respecto de los teóricos usando la ley del inverso cuadrado. (ISO, 2003).	44
Tabla 8. Parámetros de medición.	47
Tabla 9. Especificaciones del parlante Bellsound 8M300	47
Tabla 10. Frecuencia propia de la pared doble (f_0)	50
Tabla 11. Aislamiento regido por la masa.....	51
Tabla 12. Aislamiento de la pared doble.....	51
Tabla 13. Dimensiones de la cámara anecoica del LaVA – Univalle	52
Tabla 14. Dimensiones máximas de la fuente a evaluar en la cámara anecoica del LaVA.	52
Tabla 15. Materiales de construcción para la cámara anecoica del LaVA – Univalle.	57
Tabla 16. Resultados experimentales de la desviación de la ley del inverso cuadrado en la cámara anecoica del LaVA – Univalle en bandas de tercio de octava en los puntos de medición evaluados.	61

RESUMEN

Este trabajo consiste en el diseño y la construcción de una cámara anecoica que recrea condiciones acústicas de espacio al aire libre dentro de un recinto cerrado. Frente al acondicionamiento acústico de recintos cerrados se han realizado muchos estudios, investigadores que han desarrollado modelos de los fenómenos acústicos en recintos cerrados. Haciendo uso de las teorías existentes, se realizó el diseño de una cámara anecoica para el Laboratorio de Vibraciones y Acústica de Univalle. El dimensionamiento de la cámara se hizo con base en el espacio disponible en el Laboratorio, el cual consta de 2,5m (ancho) x 2,5m (largo) x 2,5m (alto). El diseño acústico de la cámara se hizo teniendo en cuenta que su construcción sería llevada a cabo con materiales provistos por el mercado local y que el dinero disponible para la compra de materiales no debía exceder los \$12'000.000. La evaluación de la cámara se llevó a cabo en una diagonal de la cámara, esto con el objeto de conocer la desviación de la ley inverso cuadrado en la dirección donde se propone se realicen futuros ensayos. Los resultados de la evaluación de la ley del inverso cuadrado están dentro de las desviaciones admisibles estipuladas por la norma ISO 3745.

INTRODUCCION



Figura 1. Cámara anecoica del Laboratorio de Vibraciones y Acústica de Universidad del Valle (Cali – Colombia)

Una cámara anecoica (Figura 1) es un recinto cerrado, diseñado y construido con el fin de recrear las características del ambiente al aire libre ideal, esto en relación con el comportamiento de ondas sonoras en su interior. Se le llama ambiente al aire libre ideal porque está exento de perturbaciones externas (sonidos), exceptuando las emitidas por la fuente que es controlada para fines de estudios acústicos en el sitio. Este tipo de ambiente es el propicio para tomar medidas de emisión y recepción de ondas sonoras por parte de distintos tipos de fuentes y receptores, las cuales son objeto de estudio en el campo de la ingeniería, la medicina, las ciencias puras, la industria, etc.

El ambiente al aire libre para el estudio del sonido no es apto debido a la interferencia que puede ser el canto de un ave, el ruido de los motores de un avión, el sonido resultado de la interacción del viento con los árboles, los repentinos cambios en el clima (temperatura, humedad, niveles de radiación solar, etc.), los cuales son factor incidente en la propagación del sonido a través de algún medio, ya sea líquido, gaseoso o sólido, además se tendrían que tomar medidas a alturas donde las reflexiones del sonido contra el suelo no afecten las medidas. Para el caso de la cámara anecoica el medio de propagación será el aire.

La cámara anecoica es el lugar propicio para el estudio de las ondas sonoras (sonido), objeto principal de estudio en la ciencia acústica. En el caso de este tipo de cámaras se debe asegurar la máxima atenuación de los fenómenos acústicos que se presentan debido a la reflexión del sonido al chocar con algún objeto. Cuando se perturba un medio elástico (metales, fibras, polímeros, etc.) produciendo ondas mecánicas, estas viajan a través del medio que las rodee, al encontrar algún obstáculo se presentan fenómenos derivados de la reflexión de la onda sonora. Estos fenómenos son los ecos y la reverberación. Los ecos se perciben como un segundo sonido por el receptor, esto debido al tiempo de vuelo de la onda por efecto de la distancia de la fuente a las superficies

reflectantes o por la configuración geométrica del recinto. La reverberación a diferencia de los ecos es percibida como una adición de sonido que modifica el sonido original (prolongación del sonido original), esto debido a que el tiempo de viaje de la onda es tan corto que el receptor no puede percibirlo como un segundo sonido.

Sobre el acondicionamiento acústico de recintos cerrados se han realizado muchos estudios, como es el caso de las investigaciones hechas por Sabine (1900), quien hizo de la acústica arquitectónica moderna una ciencia. Desarrolló una fórmula para calcular el *tiempo de reverberación* ("El tiempo de reverberación TR defínese como el tiempo necesario para que la densidad de energía sonora decaiga 60 dB, es decir, llegue a ser 10^{-6} del valor inicial", (Beranek L. L., 1954)), además dedujo que los mejores teatros poseían un tiempo de reverberación entre 2 y 2,5 segundos. Shoeder (1960) y otros investigadores desarrollaron teorías de los fenómenos acústicos que se dan en recintos cerrados, haciendo uso de la geometría acústica y la implementación de materiales con propiedades particulares (de absorción, resonadores, reflectores acústicos, etc.) para controlar los fenómenos acústicos antes mencionados, según sean los requerimientos de la cámara a diseñar.

Una de las primeras cámaras anecoicas fue desarrollada por Bedell en 1936, quien usó cubos colgantes compuestos de hojas de muselina (tela muy fina, hecha generalmente de seda, algodón o lana) y franela. Para la década de 1940 se desarrolló la cámara anecoica Murray Hill de los laboratorios Bell, la cual fue la primera en implementar el tratamiento anecoico tipo wedge (con perfil en forma de cuña). En la década de 1950, Leo Beranek trabajó en el desarrollo de este tipo de construcciones, desarrollando las teorías bajo las cuales se basarían más adelante las normas internacionales que regirían la implementación y calificación de las cámaras anecoicas, como son la norma ANSI S12.35: Determinación de los niveles de potencia acústica de fuentes de ruido – Métodos de precisión para cámara anecoica y semianecoica y la norma ISO 3745: Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido utilizando presión acústica. Métodos de laboratorio para cámaras anecoicas y semianecoicas. Para las décadas subsiguientes a los trabajos hechos por Leo Beranek, el desarrollo en el campo de las cámaras anecoicas se basó en la investigación de nuevos materiales absorbentes sonoros, en el estudio de nuevas configuraciones geométricas de las paredes absorbentes, en el uso de recursos computacionales para la simulación de nuevos diseños, entre otros recursos, concentrándose el desarrollo de tecnologías enfocadas al desarrollo de este tipo de edificaciones en Estados Unidos y Alemania.

En Colombia, para el año 2007, la Universidad de los Andes de Bogotá construyó la primera cámara anecoica para uso en el rango electromagnético del país, con un costo alrededor de unos dos millones de dólares. Se construyó con el fin de hacer estudios en el campo de la ingeniería electrónica y de telecomunicaciones (Correa, 2008). La Universidad Nacional de Medellín construyó una cámara semianecoica para prestaciones acústicas, en la cual se realizan ensayos acústicos enfocados en el mejoramiento industrial. Colombia como país en vía de desarrollo, tiene la necesidad de fortalecer sus universidades, con el fin de ser menos dependientes en la obtención, desarrollo e implementación de nuevas tecnologías que permitan ser más competitivos a todo nivel en un mundo globalizado. Dentro de estos campos se encuentra la caracterización de partes mecánicas de vehículos, tales como motores, amortiguadores, rodamientos, sistemas de inyección, etc. En la industria de aviación en el estudio de motores de reacción, los modos de vibración de perfiles de alas, etc. La medicina hace uso de equipos de telemedicina para caracterizar enfermedades. La industria eléctrica caracteriza los transformadores en cámaras de este tipo, así como la electrónica lo hace con todo tipo de dispositivos de uso diario, como celulares, computadores portátiles, televisores, etc. Otro tipo de industrias que hacen uso de esta tecnología son aquellas que desarrollan y fabrican instrumentos musicales, entre muchos otros tipos de industrias y entes dedicados a la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías.

Alcanzar un nivel alto de competitividad a nivel tecnológico, industrial, agrícola, agrario, de servicios, entre otros campos, requiere de un esfuerzo grande en investigación y desarrollo en todos los campos del conocimiento. Para ello deben dotarse a los investigadores con los mejores equipos (en la medida de lo posible), para llevar a cabo sus estudios y que estos resulten pertinentes en la solución de problemas dentro de un mundo de oportunidades, necesidades a suplir y problemas por solucionar. Siguiendo estos lineamientos la EIME (Escuela de Ingeniería Mecánica) de UNIVALLE (Universidad del Valle), actualmente se encuentra en un proceso de dotación y acondicionamiento de sus laboratorios, tanto para la realización de ensayos dentro del plan de estudios como para la investigación y la prestación de servicios a entes externos a la universidad. Perteneciente a la EIME de Univalle está el LaVA (Laboratorio de Vibraciones y Acústica), donde se hacen estudios en la rama de la acústica y las vibraciones. Para la realización de los estudios en el campo de la acústica y las vibraciones, se hace necesario que las condiciones del ambiente (laboratorio) sean propicias para la toma de medidas experimentales. Cuando se lleva a cabo el proceso de toma de muestras de sonidos, se pretende que lo que el receptor capte sean las señales reales y no señales con ruido que hagan del proceso de medición un proceso erróneo o propenso a correcciones que requieren un alto rigor matemático, que en muchas ocasiones va acompañado de grandes errores. En la medida que podamos garantizar un espacio cerrado donde las ondas sonoras se disipen en sus paredes, podremos realizar ensayos con un mayor grado de precisión. La estrategia es usar materiales absorbentes sonoros con geometrías que propicien el estado de ambiente al aire libre ideal en el sitio. A la fecha las mediciones experimentales que se realizan en el laboratorio de vibraciones y acústica (LaVA), se hacen dentro de un recinto que no está adecuado para estos fines, por esto es de gran importancia dotar a la escuela de Ingeniería mecánica con una cámara anecoica que permita que los resultados de las investigaciones sean de mayor precisión y conduzcan a que los proyectos de investigación tengan un mayor grado de precisión y puedan ser implementados en un mundo real (campo abierto) con mejores resultados, además de esto la EIME puede prestar el servicio a quienes puedan requerirlo (universidades, empresas, FAC, investigadores, el ejército, etc.), con el fin de obtener recursos adicionales para la escuela. Algunos campos de investigación donde una cámara anecoica resulta de gran importancia como ambiente controlado para la toma de mediciones de señales son:

- Pruebas de contaminación sonora en recintos cerrados.
- Estudio de los disturbios estacionarios y de pulsos emitidos por equipos eléctricos y electrónicos.
- La caracterización de modos de vibración de instrumentos musicales.
- Estudio de emisiones acústicas de equipos mecánicos.
- Investigaciones en el campo de la medicina.
- Desarrollo de nuevas tecnologías en la industria aeroespacial.

Dada la importancia de acondicionar adecuadamente el espacio de mediciones acústicas del LaVA, se llevó a cabo el diseño y la construcción de una cámara anecoica haciendo uso de materiales provistos por el mercado local. La cámara fue diseñada para trabajar en frecuencias mayores a los 400 Hz. Su espacio de trabajo es de 1,9m (ancho) x 1,9m (largo) x 1,85m (alto) y está ubicada en el LaVA - Univalle. Para la realización del diseño se eligieron cuñas anecoicas en poliuretano, ya que es un material de una alta absorción sonora, no es perjudicial para la salud, tiene un precio que se ajusta al proyecto y es fácil de conseguir en el mercado local. Se hizo el dimensionamiento de la cámara teniendo en cuenta el espacio disponible para su construcción, que es de 2,5 m x 2,5 m x 2,5 m. El modelado de cuñas anecoicas propuestas fue simulado en la herramienta computacional COMSOL MULTIPHYSICS, el diseño de la cámara se realizó en INVENTOR, la caracterización de las espumas propuestas para posterior selección se hizo en tubo de Kundt, saliendo seleccionada la espuma D40 fabricada por Espumas del Valle S.A. El proceso de calificación se hizo bajo un método

alterno y los resultados que se obtuvieron se encuentran dentro de los límites estipulados por la norma ISO 3745.

1. ANTECEDENTES

La idea de cámara anecoica surge de la necesidad de experimentar en acústica dentro de recintos cerrados. A partir de esta necesidad surgen diseños que buscan obtener condiciones de espacio al aire libre dentro de un recinto cerrado haciendo uso de materiales absorbentes acústicos como la lana de roca, la fibra de vidrio y espumas de poliuretano en distintas configuraciones geométricas (cubos y cuñas principalmente). Una de las primeras construcciones anecoicas la hizo E.H. Bedell en el año de 1936, quien acondicionó un recinto cerrado ubicando cubos colgados del techo a distintas alturas, los cuales estaban hechos con materiales absorbentes acústicos. En la década de 1940 los laboratorios Bell desarrollaron la cámara anecoica llamada Murray Hill, siendo la más antigua en implementar materiales absorbentes con perfil tipo wedge (cuña), este tipo de cuñas son las más usadas hasta la fecha, logrando una absorción del sonido mayor al 99% (Beranek L. L., 1954). Beranek y Sleeper en la década de 1950 realizaron el diseño y la construcción de una cámara anecoica para la Universidad de Harvard (figura 2), con base en estos estudios se realizaría más tarde la norma UNE-ISO 3745 que normaliza el diseño y la calificación de una cámara anecoica. Las dimensiones internas de esta cámara son de 38 x 50 x 38 pies, usaron cuñas anecoicas de 57" de largo hechas en fibra de vidrio densidad 2,5lb/ft³. La cámara se diseñó para permitir la investigación de grandes dispositivos direccionales, los cuales en uso normal, podían recibir sonido de fuentes localizadas a cientos de pies en el espacio al aire libre, la frecuencia de corte de la cámara anecoica es 50 Hz (frecuencia más baja a la que la cámara presenta condiciones de espacio al aire libre) (Beranek L. L., 1954). Lothar Cremer propone otro tipo de diseño de cámara, usando cuñas formadas por cubos hechos en fibra de vidrio en distintas densidades, este tipo de cuñas llevan su nombre. En la figura 3 se puede observar una cámara anecoica construida con cuñas tipo Cremer. Posteriormente se han construido muchas cámaras anecoicas alrededor del mundo para industrias de autos, universidades, institutos para el desarrollo de armamento, la NASA, entre otros, ya que estas son un instrumento de gran importancia en el campo de la investigación y el desarrollo tecnológico. Este tipo de cámaras se usan en la investigación, desarrollo y evaluación de fuentes sonoras y receptores de sonido, por ejemplo para generar mapas de directividad de fuentes sonoras y niveles de presión sonora de estas en determinadas frecuencias, fuentes como parlantes, automóviles, aviones, celulares, computadores, neveras, instrumentos musicales, equipos médicos, transformadores eléctricos, ventiladores, televisores, maquinaria industrial, etc. En general los equipos, máquinas y dispositivos electrónicos que se ofrecen en el mercado están normalizados en cuanto a los niveles de ruido que emiten y su directividad.

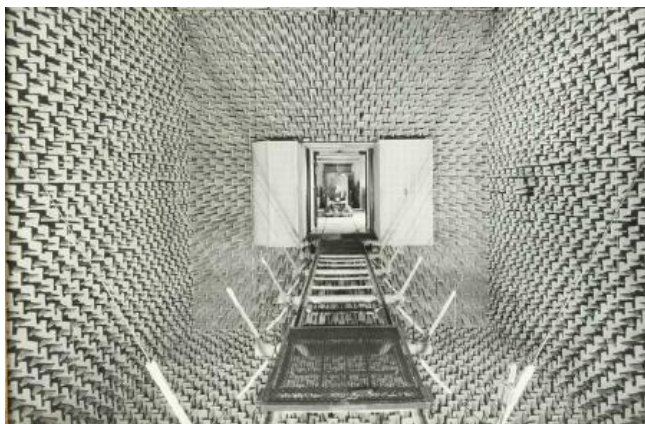


Figura 2. Cámara anecoica Universidad de Harvard. (Beranek & Sleeper, 1946)

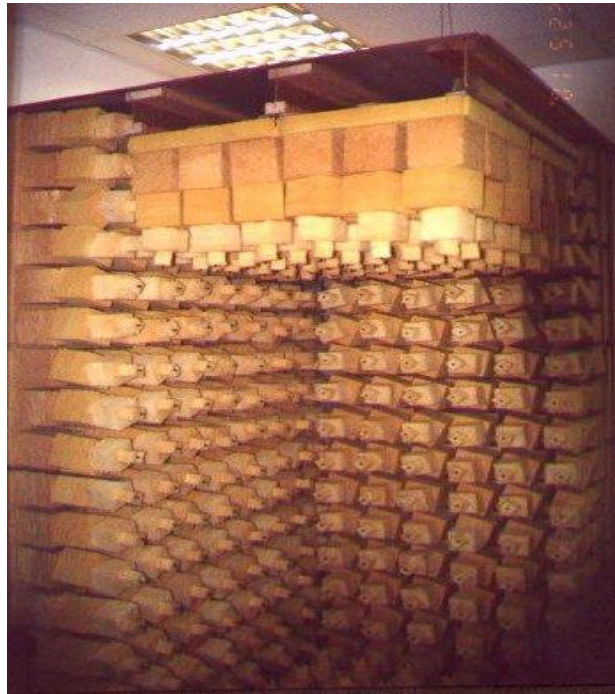


Figura 3. Cámara anecoica con cuñas tipo Cremer. (Brüel Acoustics)

En Colombia se tiene registro del diseño de una cámara anecoica para trabajo acústico por García y Quintana, estudio realizado con el fin de proponer un diseño de cámara anecoica. Construyeron un prototipo de cámara anecoica usando como material de las cuñas anecoicas poliuretano en dos densidades, densidad 18 kg/m^3 y 26 kg/m^3 , intercalando cuñas en las dos densidades definidas. La dimensiones internas del prototipo construido son de 0,82 m de alto x 1,42 m de ancho x 1,54 m de largo, las dimensiones útiles (espacio disponible luego de la instalación de las cuñas anecoicas) son de 0,48 m de alto x 1,08 m de ancho x 1,2m de largo. (García Luque & Quinatana Soler, 2007).

La calificación de una cámara anecoica se hace bajo la norma ISO 3745, que evalúa la desviación de la ley del inverso cuadrado dentro de este tipo de construcciones. La ley del inverso cuadrado al aire libre para el sonido consiste en que cuando se duplica la distancia respecto de la fuente sonora el nivel de presión sonora decae en 6 dB. El ensayo para corroborar la norma consiste en ubicar una fuente omnidireccional calibrada en el centro de la cámara anecoica, luego tomar medidas del nivel de presión sonora a lo largo de cinco trayectorias en línea recta a medida que se aleja del centro de la fuente, de tal forma que dentro de la cámara debe cumplirse la ley del inverso cuadrado mencionada o estar dentro de unos límites admisibles por norma. La desviación admisible por norma hasta 630 Hz es de $\pm 1,5 \text{ dB}$, de 800 a 5000 Hz de $\pm 1,0 \text{ dB}$ y de 6300 Hz en adelante de $\pm 1,5 \text{ dB}$. A continuación se presentan los resultados de desviación de la ley del inverso cuadrado evaluada bajo norma obtenidos por Beranek & Sleeper y por García & Quintana en sus respectivas cámaras anecoicas. El eje de las ordenadas representa la desviación de la ley inverso cuadrado en dB y el eje de las abscisas representa el espectro de frecuencias en que se realizó la evaluación en Hz.

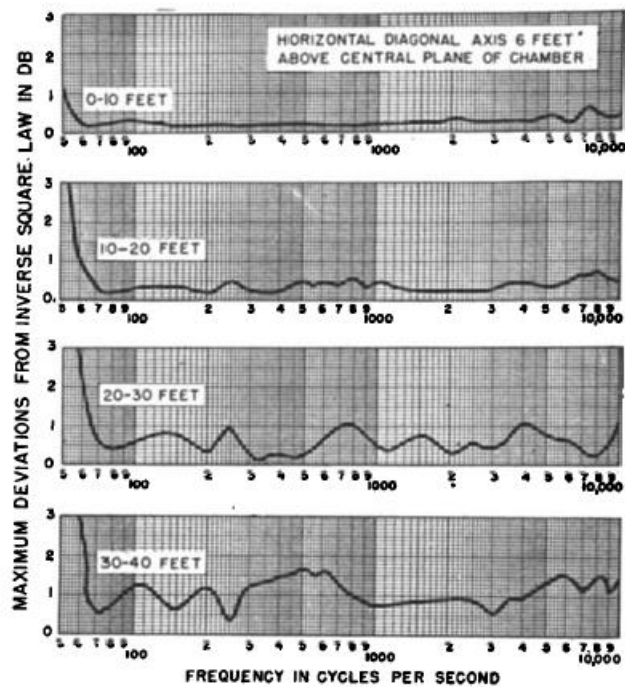


Figura 4. Resultados de la desviación del inverso cuadrado en la cámara anecoica diseñada por Beranek & Sleeper. (Beranek & Sleeper, 1946)

Beranek & Sleeper entregan los resultados de desviación del inverso cuadrado entre distintitos intervalos de distancias de la trayectoria evaluada, como se observa en cada recuadro de la figura 4.

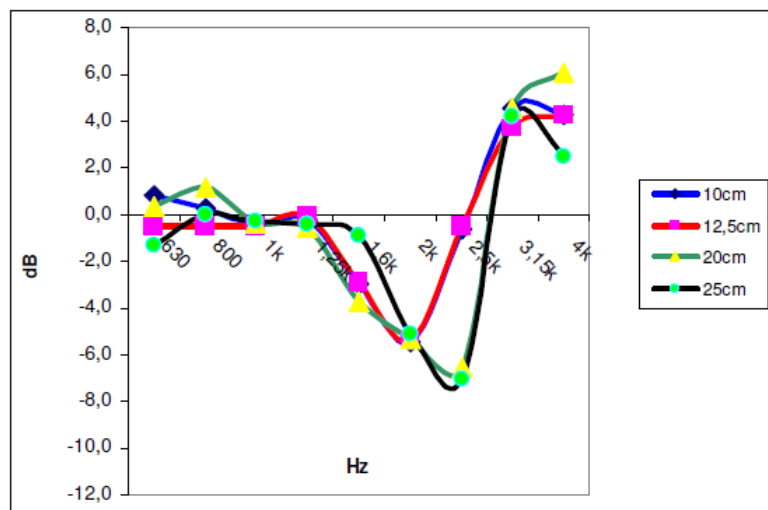


Figura 5. Resultados de la evaluación de la ley del inverso cuadrado en la cámara anecoica diseñada por García y Quintana para distancias de la fuente de 10, 12,5, 20 y 25 cm. (García Luque & Quinatana Soler, 2007)

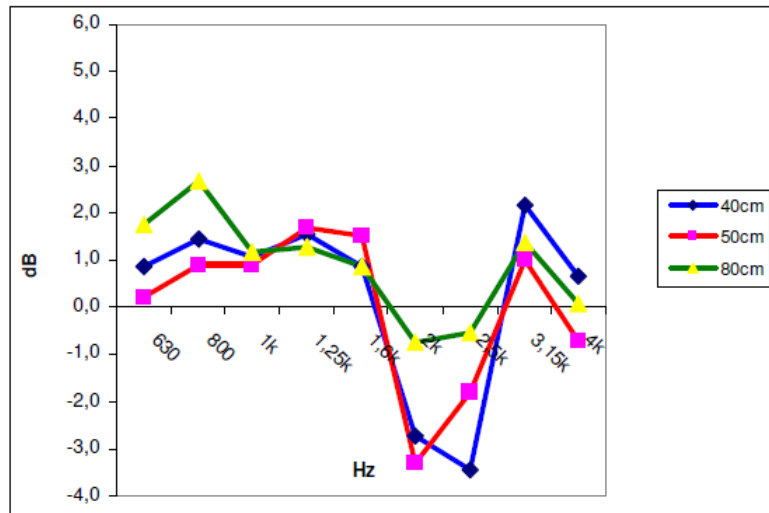


Figura 6. Resultados de la evaluación de la ley del inverso cuadrado en la cámara anecoica diseñada por García y Quintana para distancias de la fuente de 40, 50 y 80 cm. (García Luque & Quinatana Soler, 2007)

García & Quintana entregan sus resultados en distancias discretas de la trayectoria como se observa en las figuras 5 y 6. Entonces, con los máximos admisibles de la desviación de la ley del inverso cuadrado por norma y las gráficas de desviación de esta ley provistas por los fabricantes, podemos hacernos una idea de que tanto se cumple la ley inverso cuadrado en determinada cámara anecoica. Alternativamente otros investigadores proponen la calificación de una cámara anecoica con fuentes direccionales (parlantes convencionales) cuando no se tiene a disposición una fuente omnidireccional calibrada, ubicando la fuente en una esquina de la cámara anecoica (Gomez Alfageme, Sánchez Bote, & Blanco Martín) o cercana al centro de una de las paredes (Leeudomwongs, Juntarapaso, Kongthavorn, Thongboon, & Plangsaengmas, 2013). En las figuras 4 y 5 se muestra la ubicación de la fuente y las trayectorias propuestas por los investigadores mencionados.

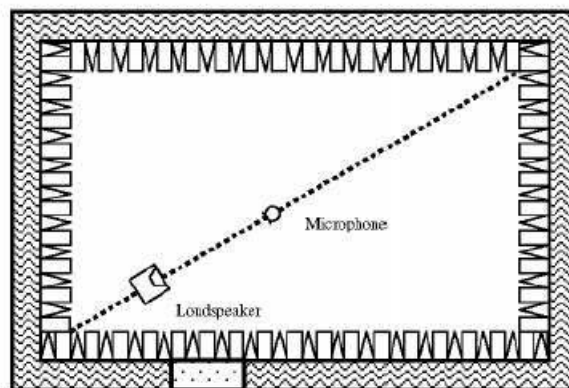


Figura 7. Montaje propuesto por Gomez, Sánchez & Blanco para la calificación alternativa de una cámara anecoica. (Gomez Alfageme, Sánchez Bote, & Blanco Martín)

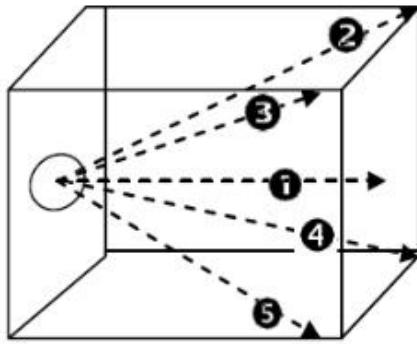


Figura 8. Montaje propuesto por Leeudomwongs, Juntarapaso, Kongthavorn, Thoongboon y Plangsaengmas para la calificación alternativa de una cámara anecoica.

En este trabajo se propone el diseño y construcción de una cámara anecoica de bajo costo que garantice condiciones de espacio libre a partir de 400hz (frecuencia de corte de la cámara), con el fin de tener un espacio adecuado en el laboratorio de vibraciones y acústica de Univalle (LaVA – Univalle) para la experimentación en acústica, además tendientes a prestar servicios a la industria u organizaciones que lo necesiten. Se propone su calificación bajo el método alternativo propuesto por Gomez, Sánchez & Blanco ya que en el laboratorio de vibraciones y acústica de Univalle (LaVA – Univalle) no se cuenta con las fuentes omnidireccionales que la norma ISO 3745 exige.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. El sonido

En la naturaleza hay distintos medios donde pueden propagarse las ondas mecánicas: el aire, el agua, los sólidos, etc. Según el medio donde se propague la onda así mismo tendrá un comportamiento particular. Una onda es la propagación de una perturbación elástica en un medio, que implica transporte de energía sin transporte de masa. Cuando perturbamos mecánicamente el medio (aire en nuestro caso) creamos ondas de presión que son captadas en nuestro organismo por medio del sistema auditivo, y transformado en señales que llegan al cerebro, señales llamadas sonidos. El estudio del comportamiento de las ondas sonoras es de suma importancia en el acondicionamiento de espacios, ya sean construcciones abiertas (estadios, parques, teatrinos, etc.) o cerradas (casas, oficinas, estudios de grabación, laboratorios, etc.), ya que conociendo el fenómeno, se pueden generar espacios con un mejor comportamiento de los sonidos dentro de ellas respecto al confort sonoro del ser humano o al objeto de la construcción.

El sonido se propaga en forma de ondas de presión, por lo tanto es de suma importancia conocer las propiedades de una onda y su comportamiento en un recinto cerrado, que es el caso de la cámara anecoica. Para esto se definirán las propiedades de una onda.

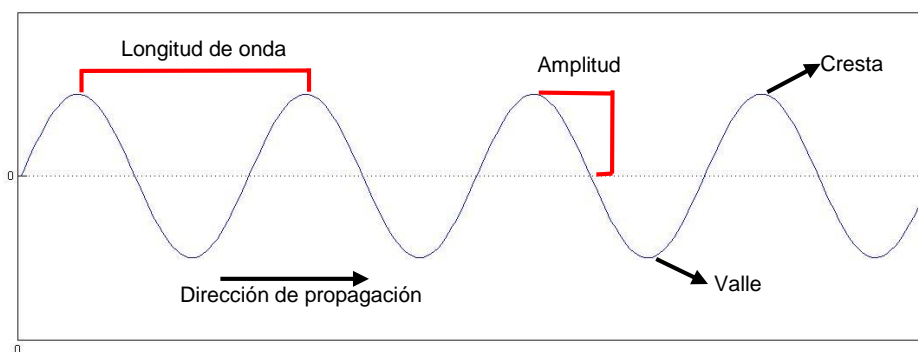


Figura 9. Onda sonora.

Las magnitudes fundamentales que permiten la definición de este fenómeno son: (Flores Jimenez & Villanueva Almaraz, 2010)

- **Amplitud (A):** le llamamos amplitud a la variación máxima del desplazamiento de una partícula en relación a su punto de equilibrio.
- **Fase (ϕ):** es la distancia a la cual se encuentra una partícula respecto de su punto de equilibrio, medida angularmente.
- **Longitud de onda (λ):** es la distancia que recorre una onda mientras el centro de perturbación cumple un ciclo.
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$
- **Periodo (T):** es el tiempo transcurrido entre la emisión de dos ondas consecutivas.
$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$
- **Frecuencia (f):** es el número de ondas que salen del centro del emisor por unidad de tiempo.

- **Velocidad del sonido (c):** para efectos de este trabajo se tendrá en cuenta la velocidad de propagación de ondas de presión en el aire. La velocidad promedio de una onda sonora en el aire es de 340 m/s a una temperatura de 20°C.

- **Impedancia acústica (Z):** cada material presenta resistencia al paso de ondas sonoras, a esta resistencia se le llama impedancia acústica

$$Z = \frac{p}{u} \quad (3)$$

Donde;

p : Presión sonora

u : Velocidad de partícula

- **Presión sonora (p):** es la presión resultante de sumarle a la presión atmosférica la presión que el sonido ejerce sobre el medio.
- **Intensidad sonora (I):** se define como la energía sonora por unidad de área.

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (4)$$

- **Potencia acústica:** es la cantidad de energía que irradia una fuente en particular.
- **Densidad de energía sonora (D):** está definida como la cantidad de energía sonora encerrada en un volumen.
- **Nivel de intensidad sonora:** dada como el logaritmo de la razón entre una intensidad sonora dada y la intensidad sonora de referencia.
- **Nivel de potencia sonora:** dada como el logaritmo de la razón entre una potencia sonora dada y la potencia sonora de referencia.
- **Persistencia acústica:** retardo que sufre una onda acústica cuando se refleja en una superficie y vuelve al punto de origen. Este tiempo está dado como aquel que demora una onda en recorrer 17 metros a la velocidad del sonido.
- **Reverberación:** fenómeno acústico dado por la reflexión del sonido, que consiste en una adición de sonido que se percibe en el punto de emisión por cuenta de la persistencia acústica.
- **STC:** es la medida de la pérdida de transmisión del sonido en una barrera, en acústica se presenta como la medida del aislamiento a ruido aéreo.

2.1.1. Bandas en frecuencia de octavas y de tercio de octavas

En general, el sonido generado por cualquier tipo de fuente contiene varias frecuencias a distintas intensidades, con el objetivo de descomponer el sonido en las frecuencias que lo componen y evaluar la intensidad de éste en las distintas frecuencias se usan las bandas de octava y de tercio de octava. Se entiende por banda al agrupamiento de varias frecuencias que se encuentran alrededor de una, a la cual se le llama frecuencia central de la banda. A la frecuencia central de cada banda se le asigna el nivel resultante de componer todas las frecuencias contenidas entre los límites superior e inferior del intervalo, los intervalos de bandas de octava y de tercio de octava pueden observarse en la tabla 1. La relación que siguen las bandas de octava es que la segunda frecuencia es el doble de la primera, la tercera el doble de la segunda y así sucesivamente, en bandas de tercio de octava la segunda frecuencia sobre la primera es igual a la raíz cúbica de dos, la tercera sobre la segunda es igual a raíz cúbica de dos y así sucesivamente. La banda central se ubica en medio de cada intervalo. Los resultados en acústica se presentan generalmente en las bandas mencionadas, las cuales han sido normalizadas. (Redonda Fernández, 2013)

Tabla 1. Frecuencias en bandas de octava y de tercio de octava.

Bandas de octava [Hz]			Bandas de tercio de octava [Hz]		
Frecuencia inferior	Frecuencia central	Frecuencia superior	Frecuencia inferior	Frecuencia central	Frecuencia superior
11	16	22	14.1	16	17.8
			17.8	20	22.4
			22.4	25	28.2
22	31.5	44	28.2	31.5	33.5
			35.5	40	47.7
			44.7	50	56.2
44	63	88	56.2	63	70.8
			70.8	80	89.1
			89.1	100	112
88	125	177	112	125	141
			141	160	178
			178	200	224
177	250	355	224	250	282
			282	315	355
			355	400	447
355	500	700	447	500	562
			562	630	708
			708	800	891
700	1000	1420	891	1000	1122
			1122	1250	1413
			1413	1600	1773
1420	2000	2840	1773	2000	2239
			2239	2500	2818
			2828	3150	3548
2840	4000	5680	3548	4000	4467
			4467	5000	5623
			5623	6300	7079
5680	8000	11360	7079	8000	8913
			8913	10000	11220
			11220	12500	17780
11360	16000	22720	17780	20000	22890

2.2. El ruido

El ruido puede definirse de distintas maneras, la norma UNE 21302-801:2001 lo define de dos maneras:

- Vibración errática o estadísticamente aleatoria
- Sonido o cualquier otra perturbación acústica desagradable o indeseable

El ruido puede caracterizarse respecto al tiempo, la frecuencia o por la manera en que se transmite.

2.2.1. Caracterización del ruido en el tiempo

- Ruido estacionario: este tipo de ruido es aquel generado por fuentes estables, como por ejemplo el ruido emitido por un ventilador, el cual emite a un nivel presión sonora constante.
- Ruido fluctuante: el ruido fluctuante es aquel posee nivel de presión sonora que varía ya sea de forma periódica o no periódica, como es el caso del ruido emitido por los carros al pasar, el cual no es constante.
- Ruido intermitente: aquel que solo está presente en determinados instantes, como es el caso de una nevera, la cual se prende y se apaga periódicamente.
- Ruido impulsivo: es el ruido que presenta impulsos cortos y posee una energía mucho mayor al ruido ambiente, por ejemplo el ruido generado al caer una moneda contra el piso. (Redonda Fernández, 2013).

2.2.2. Caracterización del ruido en frecuencia

- Ruido blanco: tiene la misma intensidad en todas las frecuencias, transporta más energía total por octava cuanto mayor es la frecuencia de ésta. (UNAD)
- Ruido rosa: su contenido de energía por frecuencia disminuye en 3 dB por octava. Esto hace que cada banda de frecuencias de igual anchura (en octavas) contenga la misma energía total. Un ejemplo de aplicación de este tipo de ruido es la obtención de respuesta en frecuencia de amplificadores. (UNAD)

2.2.3. Caracterización del ruido según la forma en que se propaga

- Transmisión del ruido aéreo: se da cuando una onda sonora externa choca contra alguna de las superficies externas de un recinto cerrado (una habitación, un teatro, una biblioteca, etc.) provocando vibraciones sobre el elemento de separación (paredes, techos, etc.), el cual transmite estas vibraciones al interior del recinto en forma de ondas sonoras, cuya amplitud y frecuencia dependen de la amplitud y frecuencia de la vibración del elemento de separación.
- Transmisión de ruidos de impacto: son originados por el choque entre elementos externos u elementos externos que chocan contra las superficies externas del recinto. Estos choques comunican energía en forma de vibración, las cuales transfieren vibraciones a los elementos del recinto que a su vez radian ondas sonoras. Estos ruidos se caracterizan por ser de muy corta duración y por su facilidad para propagarse entre elementos constructivos contiguos.

- Transmisión de ruidos de vibraciones: los ruidos de vibración se transmiten cuando algún elemento que se encuentre vibrando entra en contacto con algún elemento contiguo al recinto estudiado, haciendo que los elementos internos (paredes, techos, sillas, muebles, etc.) vibren radiando ondas sonoras. (Sancho Vendrell, Llinares Galiana, & Llopis Reyna, 2008)

2.3. Aislamiento del ruido

En el caso de una cámara anecoica es de vital importancia aislarla de todo ruido externo en la medida de lo posible, ya que el ruido externo puede contribuir a que no se den condiciones de espacio al aire libre dentro de ella, objetivo principal de la cámara, además de perturbar las mediciones que se realicen dentro de ella.

2.3.1. Aislamiento del ruido aéreo

Cuando el sonido golpea un obstáculo o pared, una parte de este se refleja, otra se absorbe en el material y otra se transmite, como se puede observar en la figura 10. La flecha roja representa el sonido que incide en la pared, la azul el sonido reflejado, la verde el sonido que se absorbe y la amarilla el sonido que se transmite. Lo que se busca con el aislamiento es reducir al máximo el sonido transmitido.

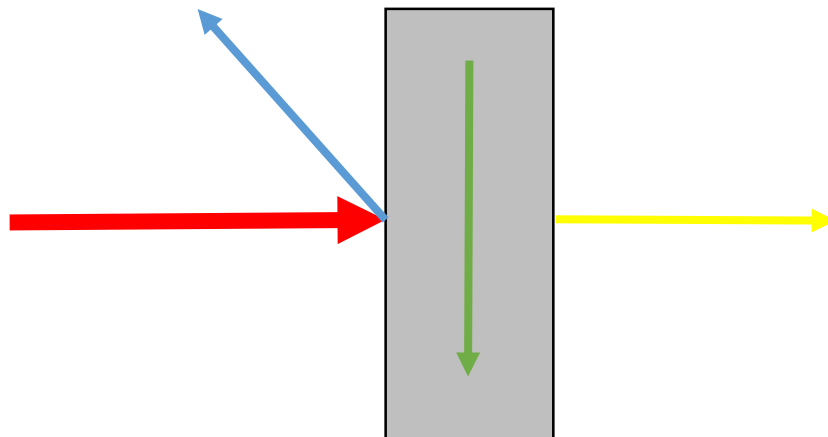


Figura 10. Reflexión, absorción y transmisión del sonido.

Con el fin de reducir el ruido que se propaga por vía aérea hacia el local que se desea aislar, se han desarrollado teorías para el cálculo del espesor de las paredes y la selección de los materiales a usar. Como aislantes a ruido aéreo se usan materiales que presenten alta densidad superficial, a mayor densidad superficial mayor cantidad de sonido incidente se reflejará en la superficie del material. Dentro de los materiales más usados se encuentran el concreto, el vidrio, polímeros de alta densidad, etc. Otro tipo de materiales usados en aislamientos acústicos son los materiales porosos o fibrosos, los cuales convierten la energía sonora incidente en calor, esto dentro de la estructura del material por fenómenos viscosos y elásticos.

2.3.1.1. Ley de masas para el aislamiento acústico de paredes simples

Esta ley determina que al duplicar el espesor de una pared simple (de un mismo material), se aumenta el aislamiento a ruido aéreo en 6dB. Lo anterior se cumple para materiales que tengan masa superficial mayor a 200 kg/m², para materiales de masa superficial menor el aislamiento acústico se aumenta solo en 4dB. Esta ley se cumple a partir de la frecuencia de resonancia de cada material hasta la frecuencia de coincidencia (f_c) (Recuero López, 2001). La frecuencia de coincidencia se puede calcular a partir de la siguiente expresión.

$$f_c = \frac{6,4 \cdot 10^4}{d} * \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot (1 - \sigma^2)}{E}} \quad (5)$$

Donde d es espesor de la pared, ρ_0 la densidad del material de la pared en kg/m³, σ es el coeficiente de Poisson y E el módulo de Young en N/m².

El aislamiento de una pared simple estará dado por la siguiente expresión:

$$R = 20 \log M * f - 48 \quad (6)$$

M : masa por unidad de superficie

f : frecuencia a la que se evalúa el aislamiento

Para el rango de frecuencias entre 100 y 3200 Hz el valor medio del aislamiento estará dado por la siguiente expresión:

$$R = 20 \log M + 12,3 \quad (7)$$

Cabe decir que los muros externos que aíslan las cámaras anecoicas de gran tamaño (~125 m³) se construyen en concreto, el espesor de estos muros puede alcanzar valores mayores a los 80 cm.

2.3.1.2. Paredes dobles con material absorbente acústico en medio

Este tipo de aislamiento acústico es más eficiente que el de una pared simple ya que puede hacerse uso de materiales más livianos y espesores mucho menores, obteniendo iguales o mejores resultados en aislamiento de ruido, es en relación con el obtenido por una pared simple. Esto se debe a que la onda acústica tiene que atravesar dos veces de un medio blando y ligero (aire + material absorbente) a un medio duro y pesado (material de las paredes). Se debe tener en cuenta la frecuencia propia de este sistema (f_0), ya que para frecuencias menores a esta, la pared doble se comporta como una pared simple de igual masa total y el aislamiento se calcula a partir de la ley de masa. A la frecuencia propia del sistema el sistema pierde eficiencia en el aislamiento y este no puede calcularse. La frecuencia propia de paredes dobles con fibra de vidrio en medio se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{1}{d} * \frac{m_1 + m_2}{m_1 * m_2}} \quad (8)$$

Donde c es la velocidad del sonido en el aire, m_1 corresponde a la densidad de masa por unidad de superficie de la pared 1, m_2 a la densidad de masa por unidad de superficie de la pared 2 y d a la separación entre paredes.

A partir de la frecuencia propia del sistema el aislamiento específico de la pared doble se calcula con la siguiente expresión:

$$R = 20 * \log \left(\frac{m_1 * m_2 * d}{2 * \rho^2 * c^3} * (2\pi)^3 * f^3 \right) \quad (9)$$

Donde ρ es la densidad del material absorbente que separa las paredes, c es la velocidad del sonido en el aire y f la frecuencia a la cual se desea calcular el aislamiento. En la tabla 2 se observan los resultados de la pérdida por transmisión de sonido (STC) en dB para distintos materiales acústicos usados en paredes dobles con y sin material absorbente intermedio.

Tabla 2. Evaluación acústica de paredes dobles. (Lehmann Fernandez, 2007)

Material panel 1	Material en medio	Material panel 2	Espacio entre placas [m]	STC
Aluminio	Aire	Aluminio	0,076	20
Plasterboard	Aire	Plasterboard	0,045	31
Panel yeso	Lana mineral	Panel yeso	0,05	44
Aluminio	Fibra de vidrio	Aluminio	0,071	41
Madera aglomerada	Lana mineral	Madera aglomerada	0,055	41
Madera	Aire	Madera	0,06	40

Se puede observar que al rellenar la cavidad intermedia entre las placas con un material absorbente sonoro se aumenta el nivel de aislamiento, como se observa para el par de placas de aluminio de la tabla 2, cuando tiene fibra de vidrio en medio y cuando solo hay aire.

2.3.2. Aislamiento a ruido de vibraciones

El montaje elástico sobre fundamento rígido es el método más empleado cuando se necesita aislar a vibraciones un elemento de otro, lo que se pretende es poner un elemento intermedio a las superficies que se deseen aislar con el fin de que amortigüe las vibraciones que se transmiten por efecto de la interacción entre los cuerpos. Para prestaciones en acústica arquitectónica se suelen usar materiales elásticos como el corcho, el caucho natural o el neopreno, o elementos más complejos como los expuestos en la figura 11 (hangers). En el caso de la cámara anecoica se usa esta estrategia para reducir las vibraciones que se transmiten vía estructural que luego pueden reproducirse como sonidos indeseados dentro de la cámara. Entre las columnas que soportan el suelo de la cámara anecoica, se ponen materiales flexibles, generalmente se usan colchones de neopreno en estos puntos. Cuando el piso de un recinto se ubica sobre un soporte elástico se le llama piso flotante.

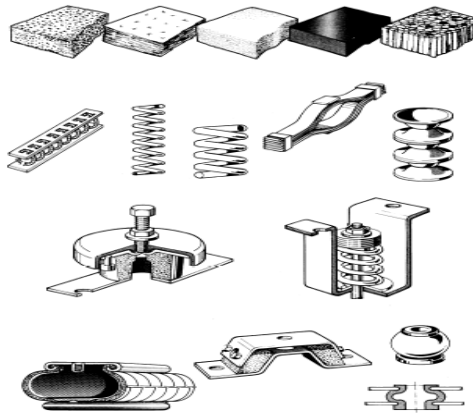


Figura 11. Elementos para sistemas de montaje elástico sobre fundamento rígido. (Moser & Barros, 2009)

2.4. Acústica de salas

El estudio del sonido en recintos cerrados es de gran importancia, ya que es el ambiente donde se desenvuelven los seres humanos gran parte de sus vidas. Cada tipo de recinto debe contar con ciertos tipos de acondicionamientos acústicos, no es lo mismo los niveles de ruido aceptables en un hospital que en una discoteca. Cada recinto posee requerimientos particulares, esto con el fin de satisfacer parámetros de inteligibilidad, directividad, niveles de ruido, etc. Los cuales son inherentes a cada recinto. En el caso de una cámara anecoica se busca que esté aislada del ruido externo y que en sus paredes interiores se absorba el sonido que se genera por alguna fuente sonora en su interior.

2.4.1. Tiempo de reverberación (TR)

El tiempo de reverberación es uno de los parámetros más usados para la calificación de recintos. Wallace Sabine a principios del siglo XX, desarrolló el concepto de tiempo de reverberación (TR), que es el tiempo que transcurre entre la emisión de un sonido y una caída de 60dB respecto su valor inicial. Fue el inicio del acondicionamiento de recintos cerrados como una ciencia. Este tiempo lo determinó al deducir la siguiente fórmula como resultado de ensayos experimentales (Sabine, 1922).

$$TR = \frac{0,161V}{A\alpha} \quad (10)$$

Donde V corresponde al volumen de la sala en m³, A al área de la superficie absorbente en m² y α al coeficiente de absorción de la superficie. La anterior fórmula es válida cuando no se tiene en cuenta la absorción del aire. Si se tiene en cuenta la absorción del sonido en el aire, la fórmula será (Alton Everest & Pohlmann, 2009).

$$TR = \frac{0,161V}{A\alpha - 4mV} \quad (11)$$

Donde m corresponde al coeficiente de absorción del aire, que será dependiente de la temperatura, la humedad y la frecuencia.

Otros científicos como Eyring, Millington y Fitzroy también desarrollaron sus propias fórmulas para hallar el TR en un recinto cerrado, siendo la de Fitzroy la más usada en la actualidad. A continuación la fórmula desarrollada por Fitzroy (Bosci, 2008).

$$TR = \frac{0,161V}{S^2} [T_x + T_y + T_z] \quad (12)$$

$$T_x = \frac{S_x}{-\ln(1 - \alpha_x)} \quad (13)$$

$$T_y = \frac{S_y}{-\ln(1 - \alpha_y)} \quad (14)$$

$$T_z = \frac{S_z}{-\ln(1 - \alpha_z)} \quad (15)$$

Donde;

s_x : superficie de las paredes laterales

s_y : superficie de la pared posterior y anterior

s_z : superficie del piso y el techo

α_x : Coeficiente de absorción promedio en las paredes laterales

α_y : Coeficiente de absorción promedio en la pared posterior y anterior

α_z : Coeficiente de absorción promedio en el piso y el techo

Para recintos pequeños y frecuencias menores a 4000 Hz se usa la siguiente ecuación.

$$TR = \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha)} \quad (16)$$

Donde V es el volumen de la sala, S el área superficial del material absorbente y α el coeficiente de absorción medio del material absorbente. En la tabla 3 se muestran los tiempos de reverberación recomendados para distintas salas.

En el caso de una cámara anecoica el TR_{30} promedio (tiempo de reverberación a una caída de 30 dB) reportado para un modelo de cámara anecoica desarrollado fue de 0,0297 s, el resultado teórico que más se ajustó al experimental fue el obtenido por la ecuación de Eyring. (García Luque & Quinatana Soler, 2007). Se observa que el tiempo de reverberación en cámaras anecoicas es muy bajo con respecto a los otros tipos de recintos, lo que es resultado del tratamiento anecoico, el cual anula los fenómenos que resultan de la reflexión del sonido. Con base en los estudios acerca de la reverberación, el estudio de la absorción de ondas acústicas y el desarrollo de nuevos materiales, se fueron desarrollando laboratorios de investigación de tipo anecoico, estos laboratorios dedicados al estudio de fenómenos acústicos, enfermedades del aparato auditivo, caracterización de equipos electrónicos, diseño de instrumentos musicales, equipos para telecomunicaciones, etc.

Tabla 3. Valores recomendados de tiempo de reverberación en distintos recintos.

VALORES RECOMENDADOS DE TIEMPO DE REVERBERACION (TR)	
TIPO DE SALA	TR [s]
Sala de conferencias	0,7 - 1,0
Cine	1,0 - 1,2
Sala polivalente	1,2 - 1,5
Teatro de ópera	1,2 - 1,2
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 - 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 - 2,0
Iglesia, Catedral (órgano y canto coral)	2,0 - 3,0
Locutorio de radio	0,2 - 0,4

2.4.2. Modos propios de un recinto

Una fuente que emite sonidos dentro de un recinto cerrado puede crear vibraciones de acuerdo con las frecuencias de resonancia del cuarto, produciendo ondas estacionarias que dan como resultado mayores tiempos de reverberación del sonido en este cuarto. En el caso de la cámara anecoica deben evitarse este tipo de fenómenos.

Las ondas estacionarias pueden aparecer de tres diferentes formas y los modos reciben su nombre por el tipo de ondas estacionarias que los generan:

- **Axiales:** el modo es generado entre dos superficies del recinto. Dos valores entre k , m o n son cero.
- **Tangencial:** el modo se generado entre cuatro superficies del recinto. Un valor entre k , m o n es cero. Acerca de 3dB menos de energía que el axial.
- **Oblicuo:** el modo es generado entre dos superficies del recinto. No tiene valores de k , m o n cero. Aproximadamente 6dB menos de energía que el axial.

Para el cálculo de los modos de vibración de un paralelepípedo con superficies totalmente reflectantes se puede usar la fórmula de Rayleigh:

$$f_{k,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (17)$$

Donde L_x, L_y, L_z son las dimensiones de la cámara en metros y k, m, n : valores enteros (0, 1, 2, 3..., n). El nombre de cada modo estará dado según los valores que tomen k, m, n . Ej: si $k = 0, m = 1, n = 1$, el modo será el 0,1,1. (García Rodríguez, 2010). Los modos de vibración axiales poseen mayor energía que los tangenciales y oblicuos, esto debido a que su aparición se da por la reflexión en menos cantidad de superficies. Entre mayor número de reflexiones más cantidad de energía se disipara en las paredes y el medio en que viaja la onda. En el caso de una cámara anecoica debe evitarse al máximo la aparición de resonancias.

2.5. Ley del Inverso Cuadrado

La Ley del Inverso Cuadrado en acústica se aplica para pequeñas fuentes puntuales de sonido que emiten uniformemente en todas las direcciones, supone que el medio en el que viaja el sonido es uniforme y que no se presentarán reflexiones ni se absorberá el sonido en este medio. Teniendo en cuenta estas condiciones el sonido viajará como una onda esférica y tendrá igual intensidad a iguales radios de medición. Por lo tanto la intensidad del sonido es inversamente proporcional a la distancia de la fuente. (Cabrera Ortiz, 2010).

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (18)$$

Donde I es la intensidad del sonido emitido por la fuente, P la potencia sonora que radia la fuente y r el radio de la esfera que envuelve el sonido radiado. La intensidad del sonido en el aire decaerá 6dB cada vez que se doble la distancia a la fuente, en el caso del sonido, esta condición es la que se busca recrear dentro de una cámara anecoica.

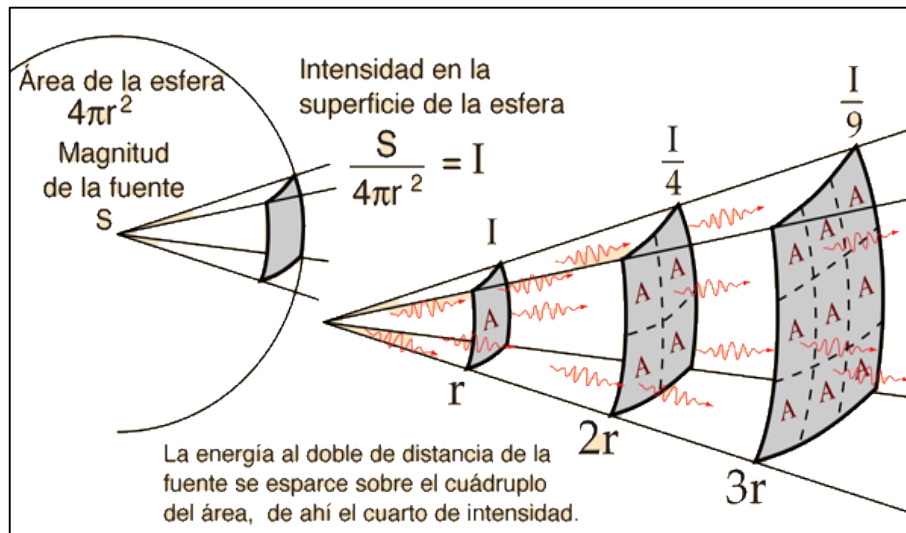


Figura 12. Ley inverso cuadrado. (hyperphysics.phy-astr.gsu.edu, 2014)

2.6. Cámaras anecoicas

El objetivo principal de una cámara anecoica es recrear condiciones de espacio al aire libre dentro de un recinto cerrado, esto con el fin de tener un espacio donde se puedan evaluar características acústicas de fuentes de sonido como la directividad, el rango de frecuencias de emisión, potencia, etc. Las partes de una cámara anecoica se pueden observar en la figura 13. Este tipo de edificaciones son llamadas box in box, debido a que se encierra una cámara en otra. La cámara externa es pensada con el fin de aislar a la cámara interna del ruido aéreo, en su construcción se emplean materiales con alta densidad superficial, generalmente se usa el concreto. La cámara interna está suspendida sobre una serie de columnas, entre las columnas y la cámara interna se ubica algún tipo de elemento elástico que permite aislar está a vibraciones que pretendan pasar vía

estructural, generalmente se usa el neopreno o el caucho natural. Las cuñas anecoicas se ubican en el interior de la cámara interna, será ahí donde se dará el fenómeno de absorción del sonido. Se llama piso flotante a aquel que se apoya sobre un material elástico u elemento diseñado como aislante de vibraciones que viajan vía estructural.

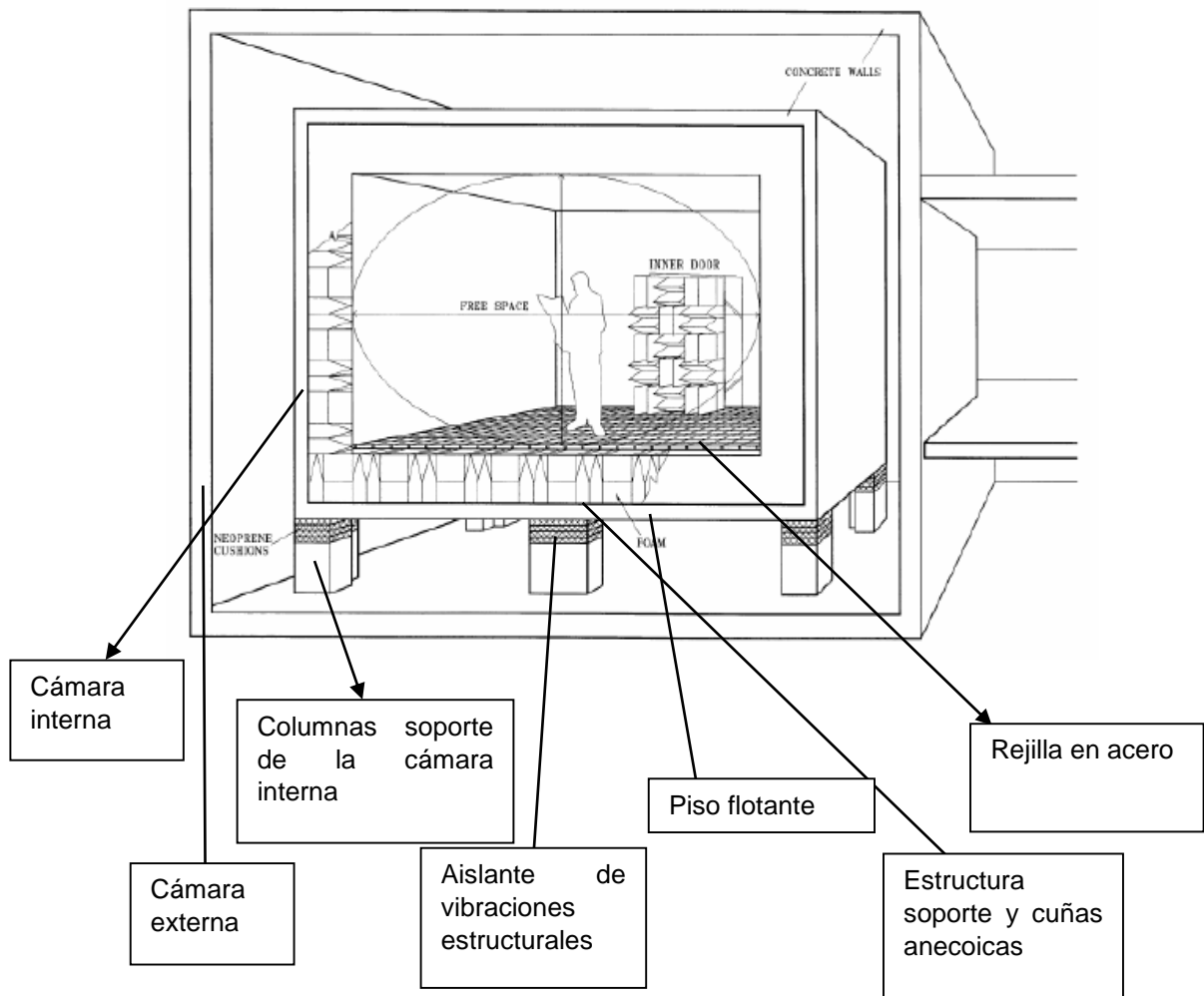


Figura 13. Partes de una cámara anecoica (UNAM – México)

2.6.1. Dimensionamiento de una cámara anecoica

El dimensionamiento de una cámara anecoica está ligado a unas restricciones mínimas de diseño que deben cumplirse, las cuales se mencionan a continuación.

- **Aislamiento:** se debe evitar al máximo que entre cualquier tipo de ruido externo a la cámara, ya sea vía aérea o por efecto de vibraciones estructurales.
- **Frecuencia de corte:** es la menor frecuencia de trabajo a la que la cámara anecoica generará condiciones de espacio al aire libre. El tamaño de la cuña más el espacio de aire deben ser iguales a $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda a la frecuencia de corte (ISO 3745).
- **Tamaño de la fuente:** según recomendaciones de la norma ISO 3745 el volumen interno de la cámara debe ser 200 veces mayor al de la fuente.
- **Campo lejano:** las medidas acústicas deben tomarse dentro del campo lejano.
- **Distancia entre la fuente y las cuñas:** se recomienda una distancia mínima de $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda a la frecuencia de corte de la cuña más cercana a la fuente.
- **Modos propios:** en especial para cámaras anecoicas pequeñas, se recomienda tener en cuenta los modos de vibración del recinto dimensionado. Debe corroborarse que los modos longitudinales no se superpongan, con el fin de evitar superposiciones constructivas de ondas que propicien la aparición de ondas estacionarias en la cámara.

La norma ISO 3745 indica como debe ser la geometría de la cámara anecoica (Leeudomwongs, Juntarapaso, Kongthavorn, Thongboon, & Plangsangmas, 2013)

$$\text{Altura:} \quad h = a + 2a + \frac{\lambda}{2} + l_c \quad (19)$$

$$\text{Ancho:} \quad w = a + 4a + \frac{\lambda}{2} + 2l_c \quad (20)$$

$$\text{Profundidad:} \quad l = a + 2a + \frac{\lambda}{2} + 2l_c \quad (21)$$

Donde a es la máxima dimensión de la fuente de sonido, $2a$ es la distancia entre el micrófono y la fuente de sonido, λ es la longitud de onda a la frecuencia de corte de la cámara anecoica (400 Hz) y l_c es la mínima distancia de la fuente a una de las paredes anecoicas ($l_c \geq \lambda/4$).

2.6.2. Cuñas anecoicas

Son el corazón de la cámara anecoica ya que en ellas es donde se disipa la energía sonora incidente. Surgen de la necesidad de obtener mayores valores de absorción sonora dentro de recintos cerrados, su configuración geométrica está ligada a la necesidad de incrementar el área de absorción sobre la cual incide el sonido, ya que la absorción sonora de una pared es proporcional a su área, a mayor área de absorción, menor energía sonora por unidad de área deberá disiparse en el material absorbente. Las cuñas anecoicas están fabricadas generalmente en espuma poliuretano flexible de celda abierta o en fibra de vidrio, ya que estos materiales presentan un coeficiente de absorción cercano a 1 en todo el rango de frecuencias.

Existen dos tipos de cuñas anecoicas, la tipo Cremer y la tipo Wedge.

- **Cuña anecoica tipo Cremer:** Las cuñas tipo Cremer se fabrican generalmente en fibra de vidrio en distintas densidades. Su configuración geométrica se logra al unir cubos de distintos tamaños y de distinta densidad del material, esto con el fin de lograr mejor absorción sonora en todo el rango de frecuencias.

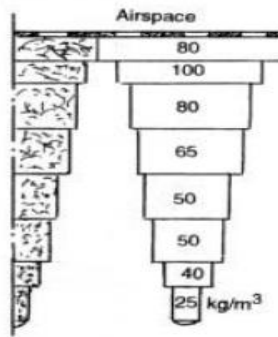


Figura 14. Cuña anecoica tipo Cremer. (Bruehl, 2003)

- **Cuña anecoica tipo Wedge:** Las cuñas tipo Wedge se fabrican generalmente en poliuretano flexible de celda abierta o en fibra de vidrio forrada en alguna tela o malla. Toda su estructura se fabrica en el mismo material. Este tipo de cuñas son las más usadas en la construcción de cámaras anecoicas, ya que su proceso de fabricación es más simple que el de las cuñas tipo Cremer, obteniendo eficiencias en absorción más altas. Existen tres tipos de geometrías en las que se manufacturan este tipo de cuñas, piramidal, tetraedral y exponencial (figura 15).

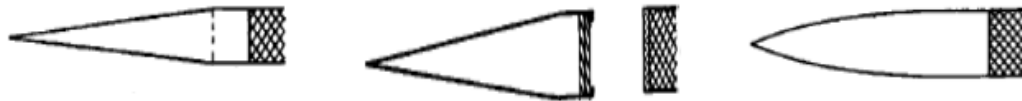


Figura 15. Cuña anecoica wedge tipo piramidal, tetraedral y exponencial. (Beranek & Sleeper, 1946)

2.6.2.1. Dimensionamiento de una cuña anecoica

El dimensionamiento de las cuñas está ligado a la frecuencia de corte de la cámara anecoica, la cual es la frecuencia más baja a la cual se desean tener condiciones de espacio al aire libre, entre más baja sea esta mayor será el tamaño de las cuñas. Las partes de una cuña anecoica se pueden observar en la figura 16. Se recomienda que el largo total (D) sea un cuarto de la longitud de onda a la frecuencia de corte. Generalmente en cuñas tipo wedge la base (L_2) corresponde a valores cercanos a $1/6$ de D , L_1 a $5/6$ de D y el espacio de aire (L_3) a valores cercanos a $1/8$ de D . El ángulo θ recomendado está alrededor de 30° , ángulos mucho menores incrementan excesivamente el número de cuñas a usar y ángulos mucho mayores reducirán el área de absorción total. El ángulo θ define el alto de la base de la cuña, que generalmente es igual al valor de d , esto según el fabricante. Beranek & Sleeper presentan en la figura 17 la manera de dimensionar una cuña anecoica basados en la frecuencia de corte de la cámara anecoica, definida esta pueden dimensionarse las partes de la cuña.

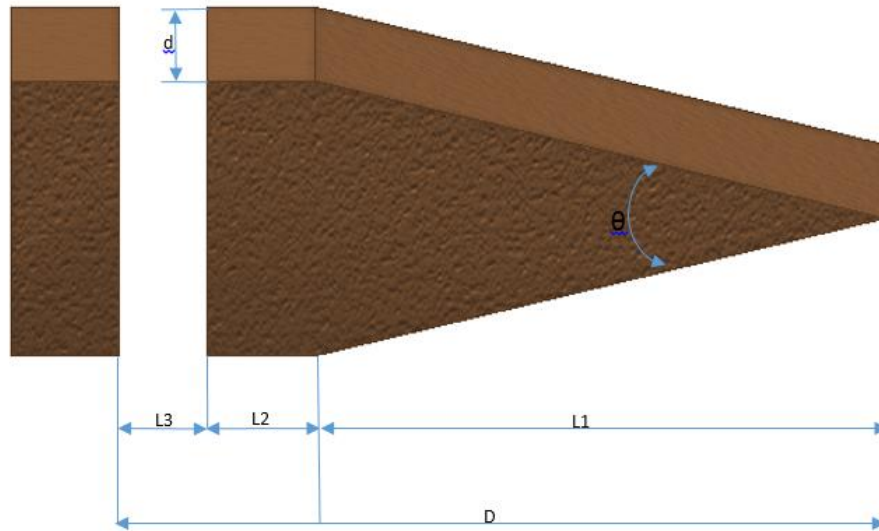


Figura 16. Partes de un cuña anecoica

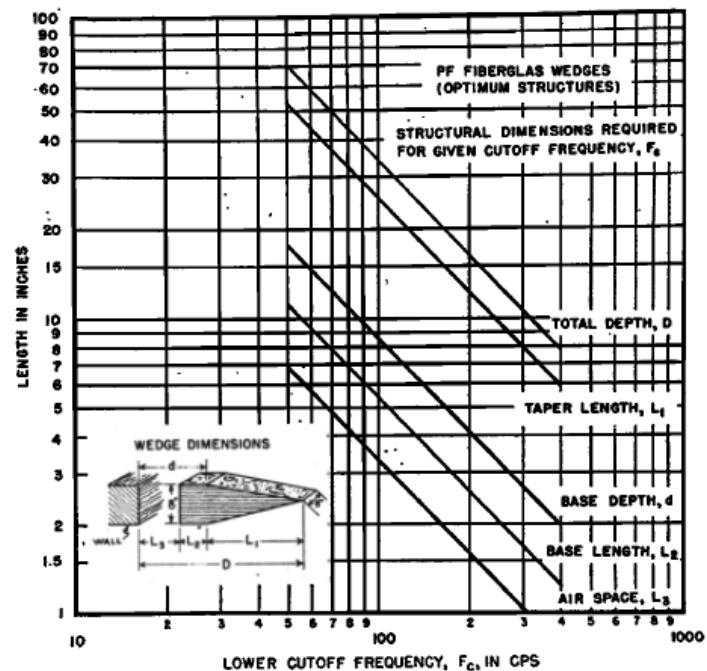


Figura 17. Especificaciones dimensionales de una cuña anecoica respecto de la frecuencia de corte. (Beranek & Sleeper, 1946)

2.6.2.2. Materiales porosos como absorbentes acústicos en cuñas anecoicas

Los materiales porosos se usan con frecuencia en la acústica arquitectónica como material absorbente de ondas sonoras; especialmente aquellos de celda abierta, llamados así por su estructura física. En cámaras anecoicas se usan por sus excelentes prestaciones de absorción

sonora para un amplio rango de frecuencias de trabajo. El mecanismo de funcionamiento de absorción sonora de los materiales porosos consiste principalmente en la disipación de energía sonora en forma de calor por la resistencia friccional que el material poroso ofrece a las vibraciones de las partículas de aire o por efectos viscosos entre las partículas de aire y el material poroso, esto en los intersticios de la estructura del material. (Carrion Isbert, 1998). Con el fin de comprender mejor este tipo de materiales se tratarán sus propiedades a nivel micro y macro.

2.6.2.2.1. Propiedades microscópicas de los materiales porosos

- **Resistividad al flujo (σ):**

Los materiales porosos poseen una estructura de túneles interconectados de forma irregular, presentándose resistencia al movimiento de las partículas de aire a través de ellos, esta resistencia es llamada resistencia al flujo. “El parámetro más importante el cual determina las propiedades de absorción y transmisión del sonido de materiales acústicos es la resistividad al flujo” (Joshi, Shravage, Jain, & Karanth, 2011). La resistencia al flujo es dependiente de la porosidad y la tortuosidad del material acústico, además una mayor cantidad de pequeños poros o pequeñas fibras darán como resultado un valor mayor de este parámetro. (Joshi, Shravage, Jain, & Karanth, 2011). Las normas ASTM-C522 e ISO 9053, especifican el método para medir la resistencia al flujo de aire en materiales acústicos. En la figura 18 se puede observar el montaje propuesto para la realización de este tipo de ensayos, y en la tabla 4 resultados de la resistividad al flujo para espumas.

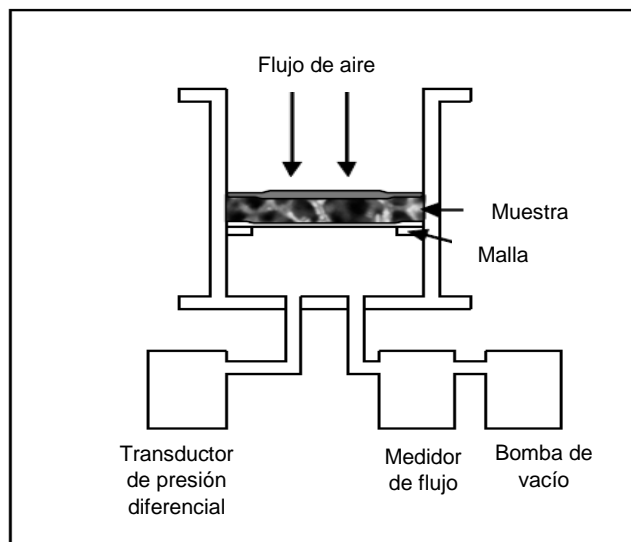


Figura 18. Esquema montaje del ensayo de resistencia al flujo de aire en materiales acústicos. (Joshi, Shravage, Jain, & Karanth, 2011)

Tabla 4. Valores de resistencia al flujo en espumas testeado por varios laboratorios. (Joshi, Shravage, Jain, & Karanth, 2011).

Laboratorio	ARAI, INDIA	ENDIF, ITALY - CANADA	SHEBROOKE UNIVERSITY	PURDUE UNIVERSITY	UNIVERSITY OF NAPLES
Resistividad al flujo (Ns/m ⁴)	11055	10518	10718	10900	11000

- **Porosidad (ϵ)**

Es la relación entre la cantidad fraccional de volumen de aire dentro del material poroso. También puede definirse como la relación entre el volumen total de poros y el volumen total del material poroso. (Castillo & Costa, 2012). El nivel de absorción del material es bueno cuando su porosidad es cercana a 1.

2.6.2.2.2. Propiedades Macroscópicas de los Materiales Porosos.

- **Factor de forma:**

Este factor indica la forma de los poros del material absorbente, lo que puede inferir en el área de absorción superficial, por lo tanto en la variación de las propiedades de absorción. Existen dos factores representativos de absorción, A y A' . El primero usado para materiales con poros cilíndricos, cuadrados y triangulares, y el segundo para materiales con geometrías irregulares de poros. Generalmente la predicción de la forma de los poros antes de la manufactura del material presenta gran complejidad, lo que impide su caracterización antes de manufacturarlo (Castillo & Costa, 2012).

- **Tortuosidad (α_{∞})**

Factor que relaciona la orientación de los poros con la dirección del campo sonoro, lo cual incide sobre la propagación del sonido al interior del material poroso. Entre mayor complejidad presente el entramado por el cual se propaga el sonido, mayor absorción se dará en los intersticios del material. La tortuosidad es el factor que representa este grado de complejidad. Existen dos maneras de evaluar este factor en materiales porosos. Una forma es evaluar la velocidad de la onda sonora solo en el fluido en relación a la velocidad de la onda sonora en el material poroso saturado con el mismo fluido. Esta relación evalúa la tortuosidad en relación a la velocidad:

$$\alpha_{\infty} = \frac{C_i^2}{C_{is}^2} \quad (22)$$

Donde C_i^2 es la velocidad del sonido en el fluido y C_{is}^2 velocidad del sonido en el material poroso saturado del fluido.

La otra forma es evaluar la resistividad del material poroso saturado con un fluido conductor en relación de la resistividad del fluido conductor.

$$\alpha_{\infty} = \epsilon * \frac{r_s}{r_f} \quad (23)$$

Donde ϵ es la porosidad del material, r_s la resistividad del material poroso con fluido conductor y r_f la resistividad del fluido conductor. En la tabla 5 se presentan resultados de tortuosidad para espuma.

Tabla 5. Las dos medidas de tortuosidad. (Allard, Castagnede, Henry, & Lauriks, 1994)

Material	Espesor [mm]	Tortuosidad (medida de resistividad)	Tortuosidad (medida de velocidad)
Espuma	4,0 y 8,0	1,5±0,1	1,52±0,05
Espuma	4,3 y 5,5	1,7±0,1	1,44±0,05
Espuma	3,8 y 5,2	1,5±0,1	1,42±0,05

2.6.3. Coeficiente de absorción en materiales porosos para prestaciones acústicas

El coeficiente de absorción acústica es el parámetro más importante en materiales porosos para prestaciones acústicas, ya que relaciona la cantidad de sonido que puede absorber un material de este tipo en relación al sonido incidente en la superficie de éste. La expresión que define el coeficiente de absorción acústica de un material es la siguiente

$$\alpha = 1 - |R^2| \quad (24)$$

donde,

$$R = \frac{p_{reflejada}}{p_{incidente}} \quad (25)$$

A R se le llama coeficiente de reflexión sonora, si este coeficiente es alto para algún material quiere decir que el material es mal absorbente sonoro o al contrario un buen aislante sonoro.

Cuando se realiza un acondicionamiento acústico se desea predecir comportamientos del sonido en el recinto en cuestión, por ejemplo en el caso de una cámara anecoica se puede predecir el tiempo de reverberación de esta basados en la ecuación 10, la cual permite calcular éste parámetro en relación al volumen de la sala, la superficie interna y el coeficiente de absorción de los materiales de las superficies. Entonces podemos usar materiales con un coeficiente de absorción más alto con el fin de tener tiempos de reverberación más cortos, lo que es lo ideal para una cámara anecoica. En caso que deseemos aislar a ruidos externos un recinto, lo que se busca es hacer uso de materiales con un coeficiente de absorción bajo, con el fin que el sonido incidente se refleje en gran medida. La tabla 6 nos ilustra el comportamiento en absorción de distintos materiales a distintas frecuencias, los materiales más densos absorben menos el sonido que los materiales porosos y fibrosos. Además se observa la incidencia del espesor en el coeficiente de absorción, y la incidencia del proceso de manufactura o fabricante en la respuesta de cada material, por ejemplo la espuma de poliuretano fabricada por Sonex responde distinto a la fabricada por Fonac en cuanto al coeficiente de absorción a distintas frecuencias.

Tabla 6. Coeficientes de absorción acústica de distintos materiales.

Material	Coeficiente de absorción α					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Hormigón sin pintar	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Ladrillo sin pintar	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Placa de yeso	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Madera aglomerada en panel	0,47	0,52	0,50	0,55	0,58	0,63
Espuma de poliuretano (Fonac)50mm	0,15	0,25	0,50	0,94	0,92	0,99
Espuma de poliuretano (Fonac)75mm	0,17	0,44	0,99	1,03	1,00	1,03
Espuma de poliuretano (Sonex)50mm	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01
Espuma de poliuretano (Sonex)75mm	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00
Lana de vidrio (fieltro 14kg/m ³) 50mm	0,25	0,45	0,70	0,80	0,85	0,85
Lana de vidrio (panel 35kg/m ³) 50mm	0,30	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00
Vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04

3. MATERIALES Y METODOS

El primer paso hacia la construcción de la cámara anecoica fue el diseño y construcción de la cuñas anecoicas, parte fundamental de este tipo de recintos. Con base en la literatura se seleccionó la forma y dimensiones de esta, y con ayuda de un software de elementos finitos se simuló su comportamiento. Posteriormente se procedió a seleccionar el material de las cuñas anecoicas entre las espumas del mercado local. Cada una de estas se caracterizó acústicamente y se seleccionó la más adecuada para absorber y aislar el sonido. Una vez definido el material y la geometría se procedió a terminar el diseño completo de la cámara y proceder a su construcción. Por último se caracterizó la cámara anecoica construida empleando un procedimiento basado en la norma ISO 3745. A continuación se explica con mayor detalle los procedimientos empleados en el diseño, construcción y caracterización de la cámara anecoica del Laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Universidad del Valle.

3.1. Cuñas anecoicas

En las cuñas anecoicas es donde se da el proceso de disipación de la energía sonora que se genera al interior de la cámara anecoica, fenómeno que permite a una cámara anecoica recrear condiciones de espacio al aire libre en un recinto cerrado, por lo tanto es de gran importancia realizar un estudio a fondo que permita obtener la mejor configuración geométrica de estas y un material que tenga un alto coeficiente de absorción sonora. Para lograr esto fue necesario implementar un modelo en elementos finitos que emulara el comportamiento acústico de un arreglo de cuñas incluyendo el espacio de aire y un soporte rígido. Debido a que el material de las cuñas seleccionado fueron espumas de poliuretano flexible de celda abierta fabricadas en el mercado local, fue necesario caracterizarlas acústicamente empleando un tubo de Kundt para obtener el coeficiente de absorción.

3.1.1. Simulación de espacio de aire y arreglo de cuñas anecoicas

El modelo realizado se basó en el modelo "*Porous Absorber*" provisto por la librería de Comsol. Este modelo se llevó a cabo con el fin de determinar el efecto del espacio de aire posterior a las cuñas anecoicas en la absorción y en la presión sonora reflejada en ella, con el fin de optimizar el espacio interno de la cámara anecoica. Se realizó un modelo 2d alimentado por los parámetros de tortuosidad, porosidad y resistividad al flujo expuestos anteriormente para materiales porosos usados como absorbentes sonoros (espumas). En la figura 19 se puede observar la configuración del modelo, las flechas rojas señalan la condición de frontera para la pared superior es la de radiación de onda plana, para las paredes laterales de condición periódica de Floquet y para la pared inferior de pared reflectante. Se sitúa la frontera emisora a una distancia de $\lambda/4$, donde λ es la longitud de onda a la frecuencia de corte especificada para la cámara anecoica en cuestión (400 Hz). Esta distancia es la mínima a la cual debe ubicarse una fuente para lograr un máximo de absorción del sonido a partir de la frecuencia de corte especificada.

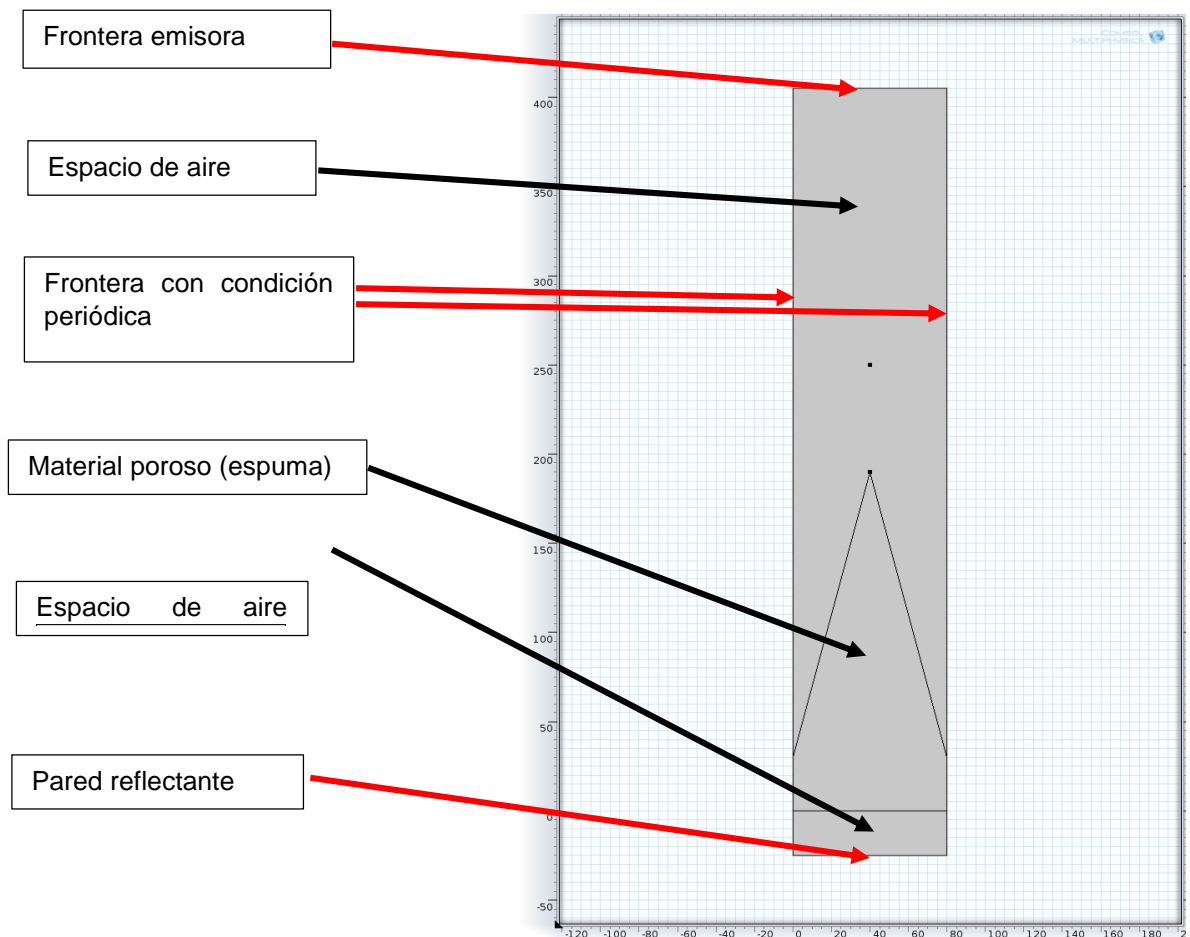


Figura 19. Esquema del modelo en Comsol.

Se eligió una malla tipo “free triangular” con un tamaño máximo de elemento de $\lambda_{\min}/6$, donde λ_{\min} corresponde a la longitud de onda menor usada en el análisis, que corresponde a 0,085 m (longitud de onda correspondiente a la frecuencia de 4000 Hz). La convergencia de la malla se evaluó con el parámetro SPL (sound pressure level), el resultado puede verse en la figura 20, donde se observa que a partir de $\lambda/6$ el valor del SPL converge. Se varió el espacio de aire para valores de 2.5 cm, 5.0 cm, 7.5 cm y 10 cm. La simulación se realizó en un rango de frecuencias de 0 a 4000 Hz.

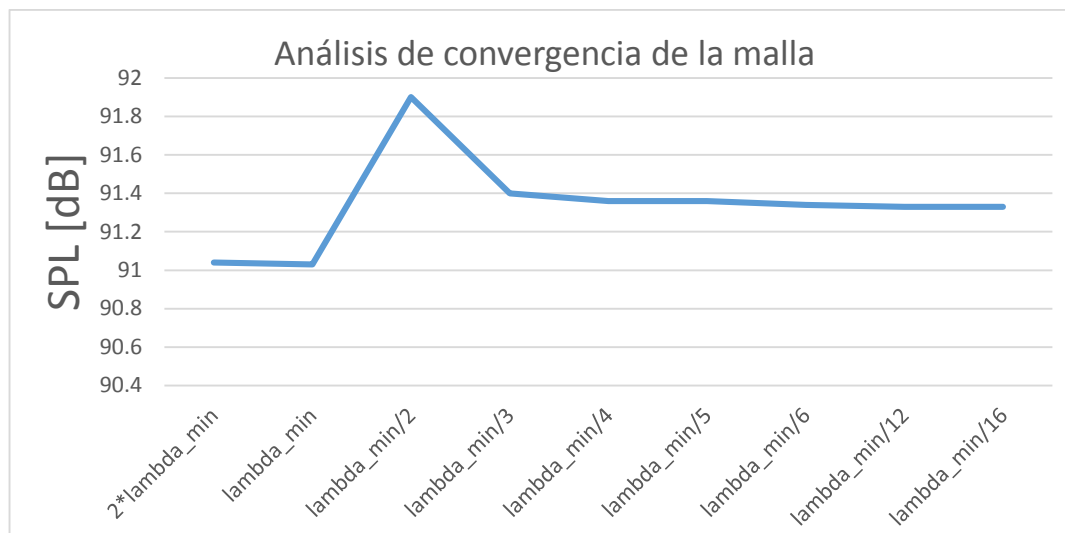


Figura 20. Análisis de convergencia de la malla del modelo computacional.

Con el modelo cuña con espacio de aire definido, se procedió a realizar una simulación en 3d con el fin de observar el comportamiento acústico de un arreglo de cuñas anecoicas con las mismas condiciones de borde usadas en el arreglo 2d, con la diferencia que las condiciones de borde no se aplican sobre líneas sino superficies.

3.1.2. Materiales propuestos para cuñas anecoicas

Para la manufactura de las cuñas anecoicas se eligió la espuma de poliuretano de celda abierta, ya que es el material más usado para estos fines, además que se consigue con facilidad en el mercado local. Las espumas que se usaron para caracterización del coeficiente de absorción en el tubo de Kundt fueron las espumas de poliuretano D40 (densidad 40 kg/m³), D30 (densidad 30 kg/m³) y espumflex (densidad 18 kg/m³), ya que las densidades de las cuñas anecoicas fabricadas en este material oscilan entre estas densidades.

3.1.3. Método para la medición del coeficiente de absorción de los materiales propuestos

Para obtener el coeficiente de absorción se empleó el procedimiento experimental definido en la norma ASTM E-1050. Los equipos usados en el ensayo son los siguientes:

- Tubo de Kundt
- Micrófono G.R.A.S ¼" Free Field Microphone 40BF
- Amplificador - Acondicionador Bruel & Kjaer - Type 2690—0F2
- Preamplificador micrófono de ¼ G.R.A.S - Type 26A6
- Computador



Figura 21. Tubo de Kundt del LaVA - Univalle.

Las muestras caracterizadas fueron discos de 45 mm de diámetro y 50 mm de espesor, además por cada tipo de espuma fueron caracterizadas 5 muestras. Los resultados se muestran en la sección 4.3.1.

3.2. Cámara anecoica

3.2.1. Norma ISO 3745

La Norma ISO 3745 plantea los lineamientos y recomendaciones que deben llevarse a cabo para calificar una cámara anecoica. Se deben emplear equipos calibrados tanto en emisión como en recepción (fuentes omnidireccionales y micrófonos). Las medidas del SPL (sound pressure level) se toman a partir del centro geométrico de la fuente, la cual se ubica en el centro de la cámara. Las medidas se obtienen a lo largo de cinco trayectorias, cuatro de ellas deben ir del centro de la fuente hacia una de las esquinas de la cámara anecoica, la restante en cualquier dirección. Los resultados deben presentarse en bandas de tercio de octava o en octavas. La teoría que debe usarse para determinar las desviaciones respecto de la ley del inverso cuadrado se expone a continuación.

Para calificar una cámara anecoica a partir de los valores de SPL medidos en las posiciones especificadas se necesitan estimar los niveles de presión sonora teóricos. Estos serán determinados para cada punto de medida por la siguiente ecuación:

$$L_p(r) = 20 \log \left[\frac{a}{r - r_0} \right] dB \quad (26)$$

Donde r es la distancia desde la fuente hasta la posición de medida,

$$a = \frac{(\sum_{i=1}^N r_i)^2 - N \sum_{i=1}^N r_i^2}{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N q_i - N \sum_{i=1}^N r_i q_i} \quad (27)$$

$$r_0 = - \left[\frac{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N r_i q_i - \sum_{i=1}^N r_i^2 \sum_{i=1}^N q_i}{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N q_i - N \sum_{i=1}^N r_i q_i} \right] \quad (28)$$

$$q_i = 10^{-0,05 L_{pi}}$$

L_{pi} : es el nivel de presión sonora de la i -ésima posición de medida

r_i : es la distancia de la i -ésima posición de medida desde el centro

N : es el número de posiciones de medida por cada línea de medición

Una vez determinados los niveles de presión sonora teóricos se procede a calcular la desviación de los niveles de presión sonora respecto de la ley del inverso cuadrado por la siguiente ecuación:

$$\Delta L_{pi} = L_{pi} - L_p(r_i)dB \quad (29)$$

Donde,

ΔL_{pi} : es la desviación de la ley del inverso cuadrado en decibeles

L_{pi} : es el nivel de presión sonora de la medida en la i -ésima posición en decibeles

$L_p(r_i)$: es el nivel de presión sonora a la distancia r_i estimada por la ley del inverso cuadrado en decibeles.

Las desviaciones admisibles según la norma ISO 3745 se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Máxima desviación admisible de las medidas de los niveles de presión sonora medidos respecto de los teóricos usando la ley del inverso cuadrado. (ISO, 2003).

Tipo de cámara de ensayo	Frecuencias en tercio de banda de octava [Hz]	Desviación admisible [dB]
Cámara anecoica	≤630	±1,5
	de 800 a 5000	±1,0
	≥6300	±1,5

3.2.2. Mediciones acústicas

Con el fin de evaluar el desempeño de la cámara anecoica construida del Laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Universidad del Valle se llevaron a cabo mediciones experimentales para determinar el nivel de presión sonora y las desviaciones admisibles.

3.2.2.1. Tipo de señal usada

Para la caracterización se usó ruido rosa, ya que este tipo de señal posee igual contenido de energía en el rango de bandas de frecuencias a evaluar. El rango de frecuencias evaluadas fue de 100 a 4000hz en bandas de tercio de octava. La señal ruido rosa se generó en Matlab empleando un script. La señal en el tiempo y su espectro en frecuencia se muestran en las figuras 23 y 24 respectivamente. Para obtener el espectro en frecuencia de la señal de ruido rosa se aplicó la transformada de Fourier mediante un script en Matlab.

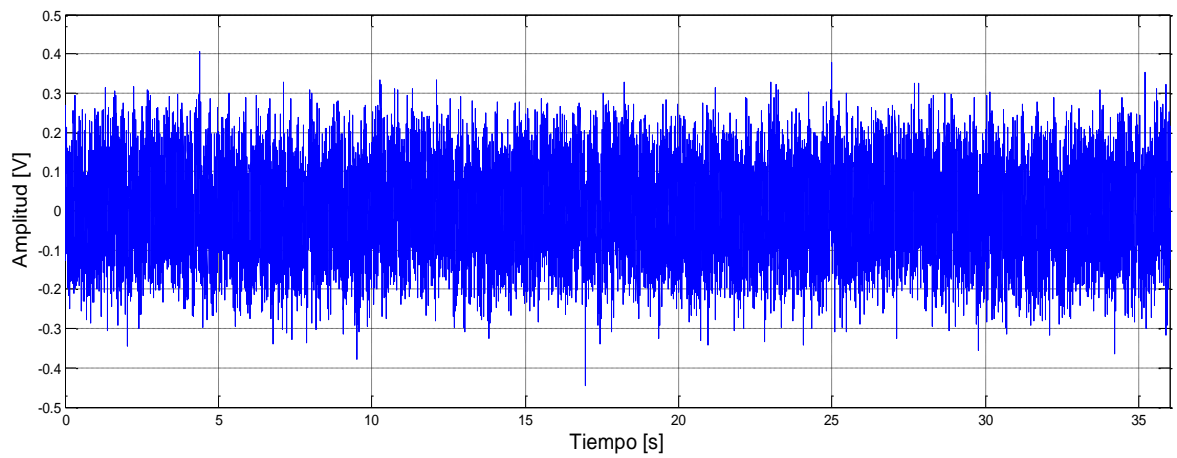


Figura 22. Señal Ruido Rosa.

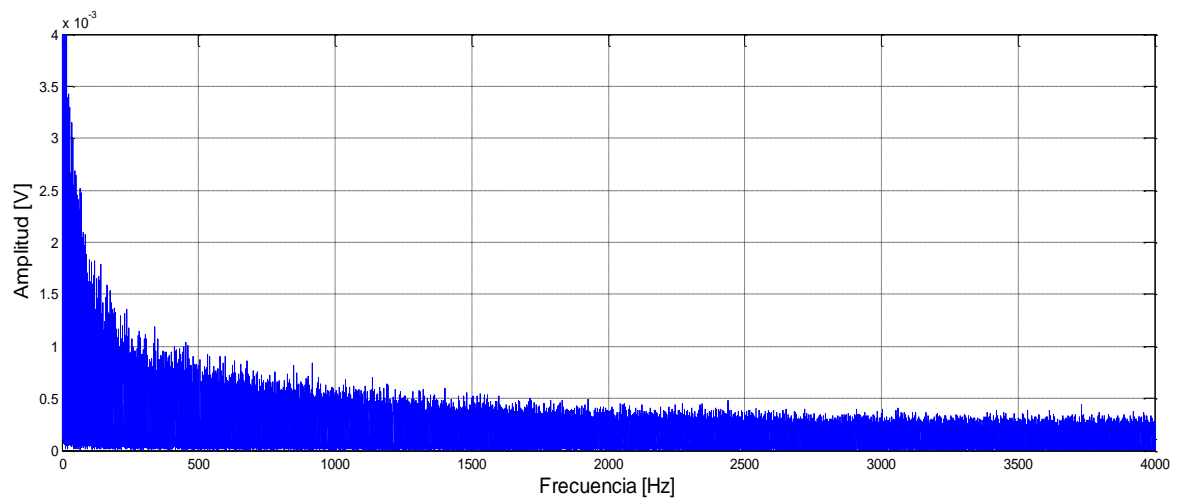


Figura 23. Espectro frecuencial de la señal Ruido Rosa.

Teniendo la señal seleccionada y conociendo su espectro en frecuencia se procedió a evaluar el comportamiento de la fuente respecto de la señal que se le envía. En la figura 24 y 25 se muestra la respuesta en el tiempo y en la frecuencia, respectivamente de la fuente para la señal de ruido rosa que se le envía. Se observa que la fuente tiene una respuesta frecuencial aceptable en el rango de frecuencias donde se va a evaluar la ley del inverso del cuadrado, que es de 100 Hz a 4000 Hz.

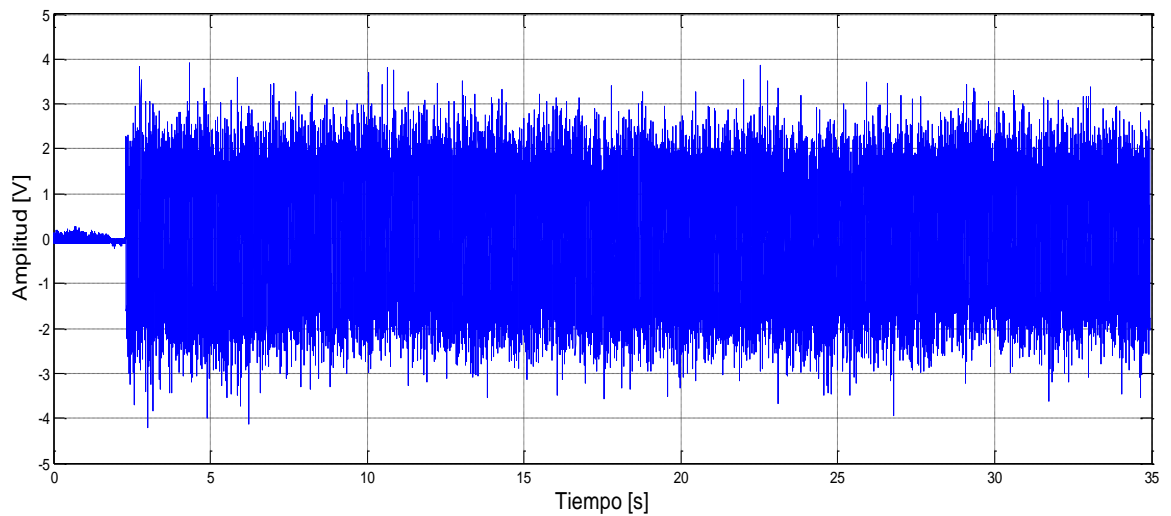


Figura 24. Medición acústica en el dominio del tiempo de la señal ruido rosa.

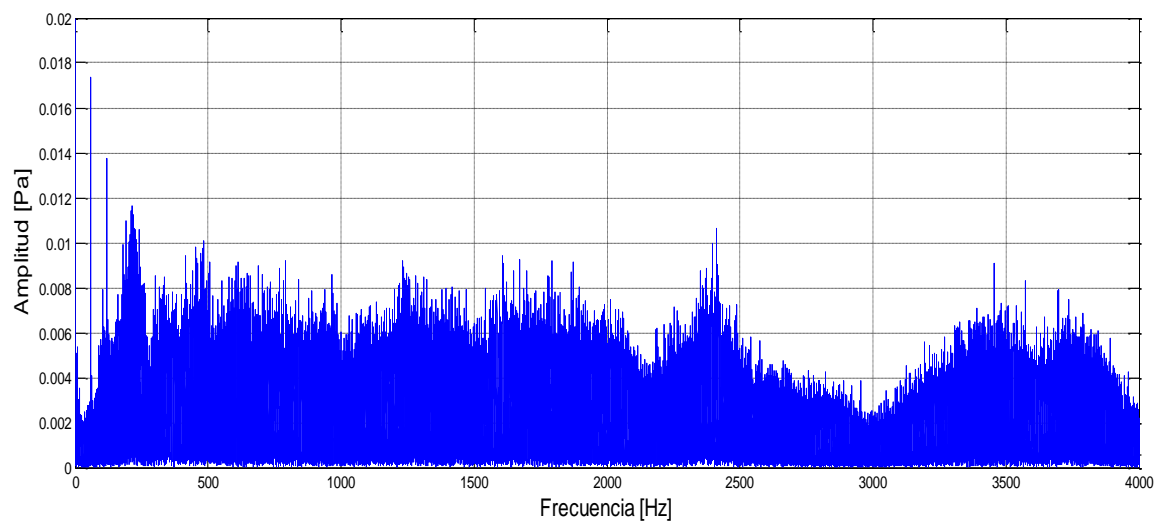


Figura 25. Espectro frecuencial de la señal ruido rosa medida.

3.2.2.2. Equipos

Los equipos usados para medición del sonido son: un Micrófono G.R.A.S $\frac{1}{4}$ " free field microphone 40BF, un preamplificador para micrófono de $\frac{1}{4}$ G.R.A.S - type 26A6, un amplificador - acondicionador Bruel & Kjaer - type 2690—0F2 y un sistema de adquisición de datos Agilent U2531A.

Tabla 8. Parámetros de medición.

Parámetro	
Frecuencia de muestreo	30000 Hz
Tiempo por medida	40 s
Unidad de las medidas	V
Sensibilidad del micrófono	1V/Pa

En la emisión del sonido se usó un computador donde se generó la señal ruido rosa, un amplificador marca AIWA y un parlante Bellsound referencia 8M300 (8ohm – 200Watts). Cabe anotar que se usó una fuente direccional, ya que el laboratorio de vibraciones y acústica no cuenta con la fuente omnidireccional calibrada recomendada por la Norma ISO 3745. Las características de la fuente y su respuesta en frecuencia se pueden observar en la tabla 9 y figura 27 respectivamente. Este tipo de fuente es de respuesta plana, es decir responde bien en todo el rango de frecuencias para el que se diseña, lo que se pudo corroborar en el apartado anterior (espectro en frecuencia de la señal ruido rosa medida). Su rango y respuesta en frecuencia permite predecir su comportamiento en las frecuencias de interés del ensayo a realizar.

Tabla 9. Especificaciones del parlante Bellsound 8M300

Especificaciones	
Diámetro Nominal	8"
Impedancia	8 Ohms
Potencia	300 Watts
Sensibilidad 1W/1M	97±2 dB
Rango de Frecuencias	60 - 7000 Hz

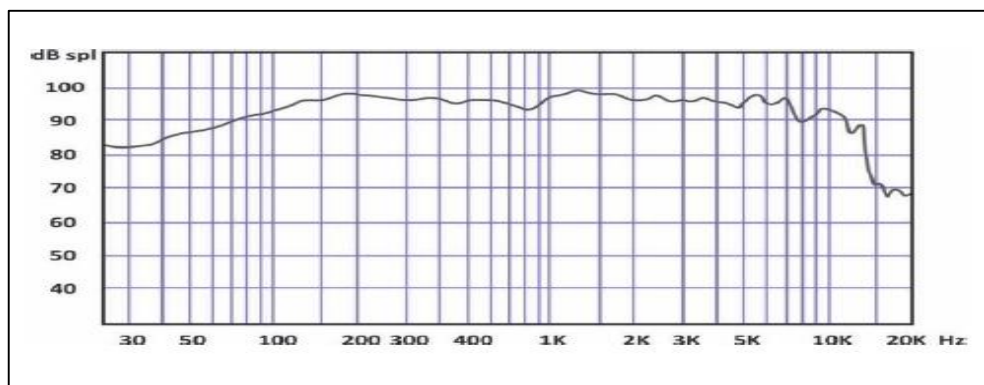


Figura 26. Respuesta en frecuencia del parlante Bellsound 8M300. Gráfica del fabricante.

3.2.3. Procedimiento de medición aplicado

El método usado para evaluar la cámara anecoica del LaVA se basa los lineamientos que proponen Gomez, Sánchez y Blanco para testar una cámara anecoica. Ellos proponen usar una fuente direccional en vez de una omnidireccional y ubicar la fuente sonora en una esquina de la cámara anecoica, respetando una distancia de $\lambda/4$ entre la fuente y la pared más cercana.

Para la prueba realizada en la cámara anecoica del LaVA se tomaron diez puntos de medida, cada uno espaciado por 10 cm en línea recta. El primer punto de medida a 1 m de distancia de la fuente como se muestra en la figura 27. Por cada punto se tomaron 5 medidas con el fin de minimizar el error. Cabe anotar que el sonido se captura por treinta segundos para cada medición. En la figura 27 se observa la ubicación de la fuente y la dirección de las trayectorias de medidas realizadas. La flecha roja indica la dirección en que se toman las medidas, que va de una esquina inferior a una superior en diagonal. (Se entiende por esquina el punto de unión entre dos paredes y el piso o el techo).

Para testar la cámara anecoica del LaVA se siguieron los siguientes pasos:

- Se posicionó la fuente a una distancia de $\lambda/4$ (longitud de onda respecto de la frecuencia de corte) de la pared más cercana en una esquina de la cámara, la posición puede observarse en la figura 29.
- Se posicionó el micrófono en la primera posición de medida a 1m respecto del centro geométrico de la fuente como se muestra en la figura 29.
- Se comenzó a capturar con el sistema de adquisición de datos.
- Se corrió el código que genera el ruido rosa.
- Se guardaron los datos en un archivo .csv para su posterior análisis.
- Se realizaron los mismos pasos para las demás posiciones de medida.

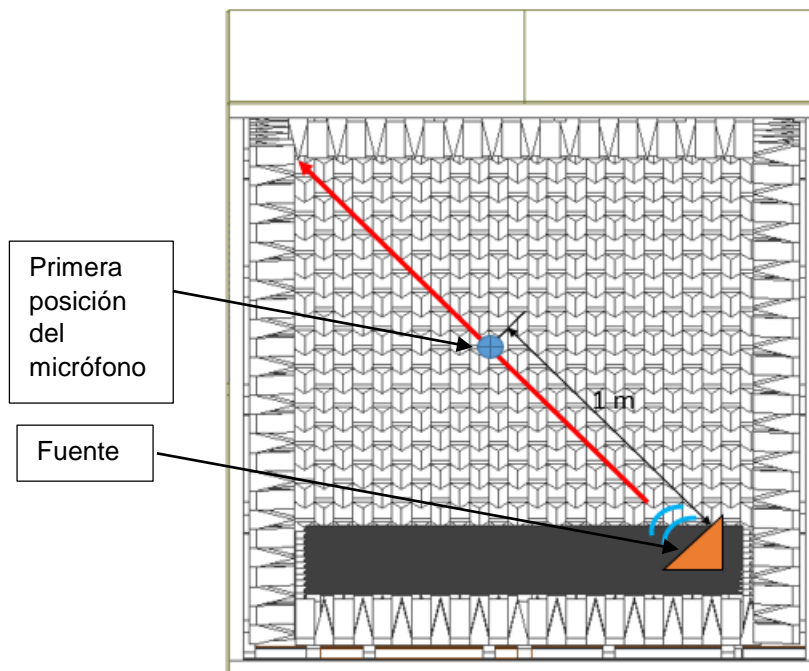


Figura 27. Ubicación de la fuente y dirección de las medidas

Los sistemas de emisión y recepción de la señal evaluada, se observan en la figura 28. Los bloques azules representan los elementos de emisión del sonido y los bloques verdes los de recepción. Entonces, la señal ruido rosa se genera en el computador, luego se amplifica y se reproduce en el parlante, luego se captura en el micrófono, pasa por el preamplificador y amplificador del micrófono para ser capturada en el sistema de adquisición de datos, que a su vez traslada la información al computador.

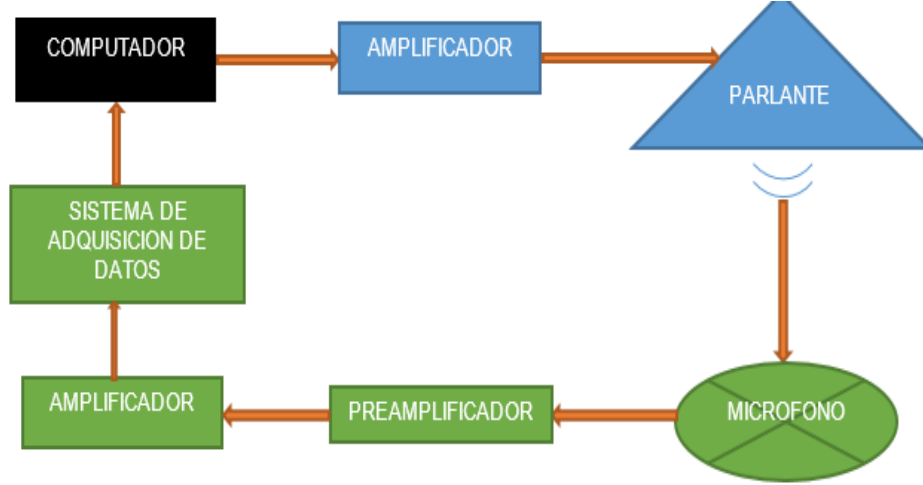


Figura 28. Diagrama de bloques del sistema de emisión y recepción de la señal evaluada.

A los datos obtenidos para cada punto de medición se les aplicó la transformada de Fourier con el fin de obtener los resultados de amplitud en el dominio de la frecuencia. Los resultados se deben presentar en bandas de frecuencia de tercios de octava, por lo cual se deben determinar los niveles de SPL para cada banda con base en las siguientes ecuaciones (Moser & Barros, Ingeniería Acústica - Teoría y aplicaciones, 2009):

$$P_{ef}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (P_i)^2 \quad (30)$$

Donde P_{ef} corresponde a la presión efectiva correspondiente a la banda de tercio de octava que se requiere hallar, P_i son los valores de presión sonora para cada punto de medición, N es el número de muestras. N depende de la frecuencia de muestreo con que se realizan las mediciones. Teniendo el valor efectivo de presión de cada banda se procedió a hallar el valor del SPL correspondiente bajo la siguiente ecuación:

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{ef}^2}{P_{ref}^2} \right) \quad (31)$$

Donde,

$P_{ref} = 20 \times 10^{-6} Pa$, que corresponde a la presión de referencia

Los datos obtenidos de SPL se evaluaron según la teoría expuesta por la norma ISO 3745 presentada en el apartado 3.2.2, donde se pretende evaluar la desviación de la ley del inverso cuadrado en bandas de tercio de octava de los valores de SPL medidos en cada punto respecto los valores teóricos calculados.

4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA ANECOICA

El propósito inicial de este proyecto era el de diseño de una cámara anecoica para prestaciones acústicas en la cual se pudiese evaluar el comportamiento acústico de vehículos. Sin embargo, en el transcurso del proyecto se obtuvieron recursos para construir una cámara anecoica en el laboratorio de vibraciones y acústica de la Universidad del Valle. El dinero disponible era de \$12'000.000 y el espacio con el que se contaba para su construcción era de 2,5m x 2,5m de planta, por 2,5m de alto. En este momento se empezó un nuevo diseño de cámara anecoica, y ya no se evaluaría el desempeño de una pared anecoica como fue propuesto en el anteproyecto, sino que se evaluaría el desempeño de toda la cámara. El análisis económico se reduciría a la realización de un presupuesto y a su posterior ejecución. En su diseño se tuvieron en cuenta materiales disponibles en el mercado local y que el valor total de estos no excediera al presupuesto disponible. El diseño debía optimizar recursos y entregar una cámara que no excediera los valores admisibles de desviaciones de la ley del inverso cuadrado a partir de una frecuencia de corte de diseño de 400 Hz.

4.1. Diseño del aislamiento a ruido aéreo.

El aislamiento de la cámara anecoica a ruido externo es de gran importancia ya que se puede realizar experimentación dentro de la cámara anecoica con niveles de ruido de fondo muy bajos. Se usó la estrategia de pared doble con material absorbente en medio como aislamiento, debido a que son tan eficientes como una pared de concreto o ladrillo del mismo espesor, además el costo de éstas y el tiempo de su construcción es mucho menor. Las placas constitutivas de la pared doble son de fibrocemento de 8 mm de espesor como pared externa y placas de madera aglomerada (OSB plus) de 9,5 mm de espesor como pared interna. El fibrocemento se usó como pared externa ya que tiene una densidad superficial de 12,03 kg/m² (m1), una densidad superficial alta frente a otras placas de este tipo ofrecidas en el mercado. Con el fin de evitar resonancias entre las placas que conforman la pared doble se recomienda usar un material con características distintas para cada placa. La densidad superficial de las placas de madera empleadas es de 5,98 kg/m² (m2). El material intermedio usado fue fibra de vidrio comercial de espesor de 2,5", la cual tiene un coeficiente de reducción de ruido (NRC) de 0,85, el fabricante fiberglass habla de una disminución de hasta 30 dB en el ruido no deseado.

La frecuencia propia de la pared doble (f_0) se calculó con el fin de saber hasta que rango de frecuencias el aislamiento estaría gobernado por la ley de masas, el resultado se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 10. Frecuencia propia de la pared doble (f_0)

m1 [kg/m ²]	m2 [kg/m ²]	d [m]	f ₀ [Hz]
12,033	5,985	0,05	210,079

El aislamiento estará regido por la ley de masas para frecuencias menores a la frecuencia propia de la pared doble calculada, que es de 210,79 Hz. El resultado del aislamiento R calculado según la ley de masas se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 11. Aislamiento regido por la masa.

Frecuencia [Hz]	m1 [kg/m ²]	m2 [kg/m ²]	R [dB]
125	12,033	5,985	19,052

El resultado del aislamiento R calculado para una pared doble con los materiales propuestos es:

Tabla 12. Aislamiento de la pared doble.

Frecuencia [Hz]	m1 [kg/m ²]	m2 [kg/m ²]	d [m]	ρ [kg/m ³]	c [m/s]	R [dB]
125	12,033	5,85	0,05	0,0925	340	50,377

A partir de esta frecuencia (125hz) el aislamiento aumentará conforme se aumente en frecuencia. (Redonda Fernández, 2013)

4.2. Dimensionamiento de la cámara anecoica

En este caso el dimensionamiento de la cámara está sujeto al espacio disponible en el sitio donde se construirá y el presupuesto disponible. El espacio disponible para su construcción es de 2,5 m³ y se sitúa dentro del Laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Universidad del Valle (LaVA – Univalle). El presupuesto con el que se contó fue de \$12'000.000. En primer lugar se definió la frecuencia de corte de la cámara anecoica como 400 Hz, un valor aceptable para una cámara anecoica pequeña, ya que entre menor es la frecuencia de corte mayor será el tamaño de las cuñas anecoicas. Por ejemplo, a una frecuencia de corte de 100 Hz el largo de una cuña anecoica debe ser de 0,85 m, lo que consumiría gran parte del espacio disponible además que el costo en material sobrepasaría al presupuesto. Las dimensiones de las paredes externas de la cámara se definieron teniendo en cuenta las medidas estándar de las placas de fibrocemento y el espacio disponible. En planta el espacio disponible es de 2,5 m x 2,5 m, el largo estándar de una placa de fibrocemento es de 2,44 m. Aprovechando las medidas estándar de la placas se definieron las dimensiones externas en planta de la cámara anecoica de 2,44 x 2,44 m. La altura y las dimensiones de la cámara interna se definieron con base en los mejores resultados obtenidos de los modos de vibración para un recinto con dimensiones cercanas a las disponibles. Las dimensiones de la cámara interna quedan definidas así: 2,34 m de ancho x 2,37 m de largo x 2,27 m de alto. La figura 29 presenta los resultados en diferencias intermodales, es decir la diferencia entre las frecuencias de dos modos de vibración contiguos, para la cámara anecoica del LaVA y una cámara anecoica diseñada por la NASA. . El eje de las ordenadas representa cada diferencia intermodal y el eje de las abscisas la separación en Hz entre estos modos. Se observa en los resultados obtenidos para la cámara del LaVA, que no hay superposición de modos a partir de la tercera diferencia intermodal, diferencia intermodal de frecuencias que están por debajo de la frecuencia de corte.

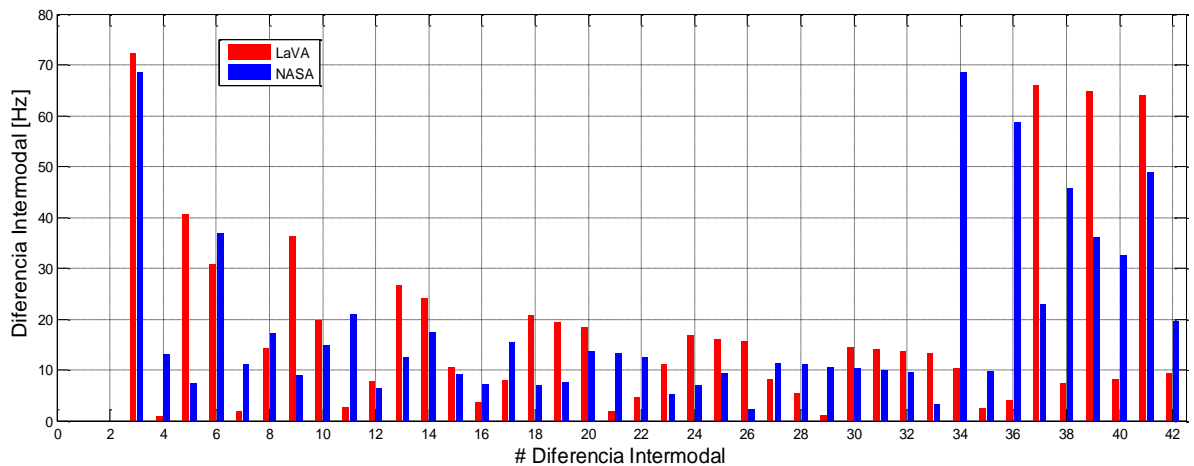


Figura 29. Resultados de diferencias intermodales para la cámara anecoica del LaVA – Univalle.

El largo total de una cuña anecoica mas el espacio de aire equivale a $\lambda/4$, donde lambda es la longitud de onda a la frecuencia de corte de la cámara anecoica, por tanto la longitud total de la cuña debe ser de 0,2125 m como mínimo. Para efectos del diseño se tomará como 0,215 m. El diseño de las cuñas se profundizará en el apartado siguiente. Entonces, conocidas las dimensiones de la cámara interna y el largo total de las cuñas se puede definir el área de trabajo o espacio disponible de la cámara anecoica, el cual tiene dimensiones de 1,94 m de largo x 1,91 m de ancho x 1,84 m de alto. En la tabla 13 se condensan las dimensiones calculadas.

Las dimensiones máximas de la fuente que puede evaluarse dentro de la cámara anecoica del LaVA se definieron con base en las ecuaciones 19, 20 y 21. En la tabla 14 se pueden observar los resultados obtenidos para las dimensiones máximas de fuentes evaluables en la cámara anecoica.

Tabla 13. Dimensiones de la cámara anecoica del LaVA – Univalle

Dimensiones de la cámara interna		Dimensiones del espacio de trabajo	
Largo	2,37 m	Largo	194 m
Ancho	2,34 m	Ancho	191 m
Alto	2,27 m	Alto	184 m

Tabla 14. Dimensiones máximas de la fuente a evaluar en la cámara anecoica del LaVA.

Dimensiones máximas de fuentes a evaluar	
Largo	0,47 m
Ancho	0,28 m
Alto	0,51 m

4.3. Diseño de las cuñas anecoicas

Esta es la parte del diseño en que más se profundizó, ya que de ellas depende en gran medida un correcto funcionamiento de la cámara anecoica, puesto que la energía sonora que se genere al interior de la cámara anecoica deberá disiparse hasta en un 99,99% en ellas.

4.3.1. Material de las cuñas anecoicas

Los resultados de la evaluación del coeficiente de absorción de las tres espumas de poliuretano de celda abierta preseleccionadas como material de las cuñas de la cámara anecoica se muestran en la figura 30.

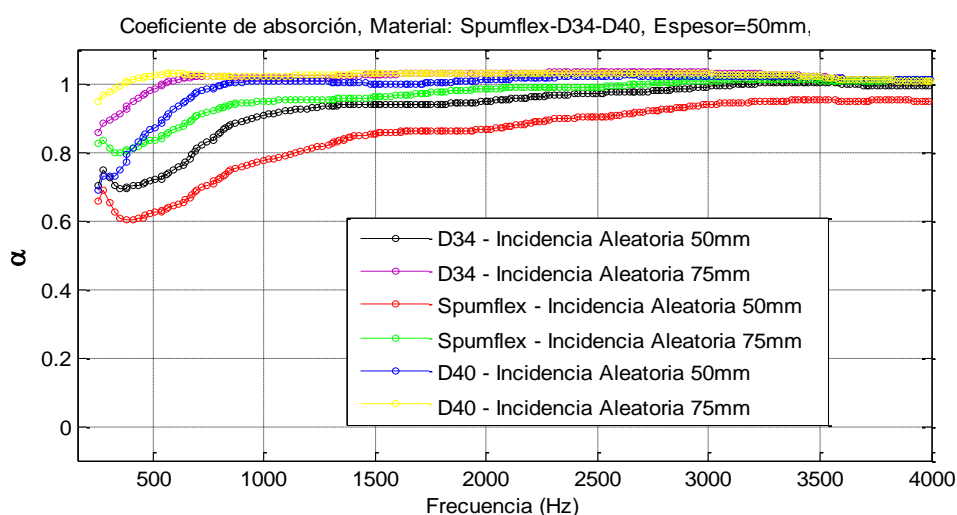


Figura 30. Resultados del coeficiente de absorción para espuma de poliuretano D34, Espumflex y D40.

De los resultados obtenidos se selecciona la espuma D40 como el material para la manufactura de las cuñas anecoicas por presentar mayor absorción del sonido en el rango de frecuencias evaluado. Cabe anotar que los valores mostrados son relativos y solo pretende exponer el mejor resultado de absorción sonora de un tipo de espuma en relación a otras.

4.3.2. Dimensionamiento de las cuñas anecoicas

El dimensionamiento de las cuñas anecoicas se realizó con base en la teoría expuesta por Beranek y Sleeper. La figura 31 muestra una gráfica de frecuencia de corte versus longitudes de la cuña anecoica. La línea roja demarca la frecuencia de corte de la cámara anecoica (400 Hz); las líneas verdes señalan las longitudes respectivas para cada parte de la cuña. Entonces, la longitud L1 es igual a 6" y la de L2 de 1,25". Las cifras se aproximaron de tal manera que L1 queda de 16 cm y L2 de 3 cm.

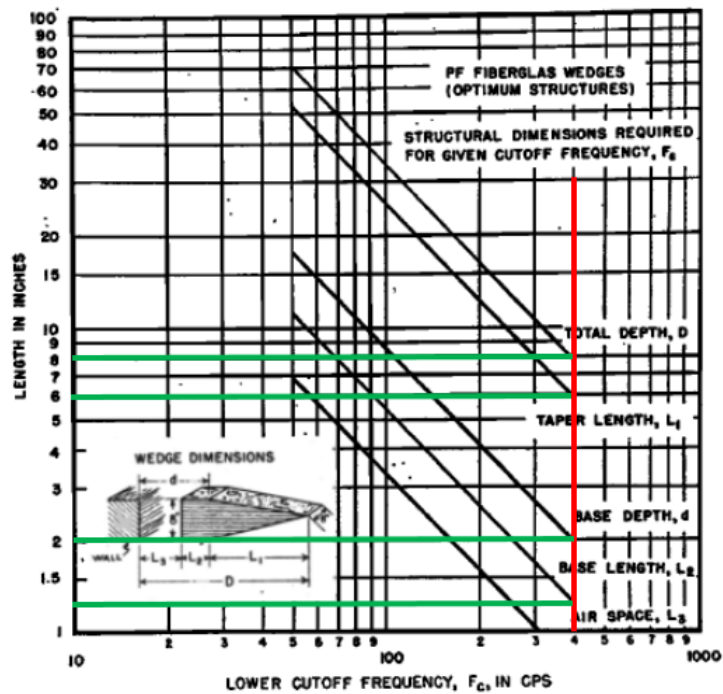


Figura 31. Frecuencia de corte versus longitudes de la cuña anecoica. (Beranek & Sleeper, 1946)

La figura 31 no entrega el dato de la dimensión del espacio de aire recomendado a esta frecuencia de corte, por lo que se realizó un modelo en Comsol con el fin de encontrar la dimensión de espacio de aire que permitiera tener los mejores resultados en absorción del sonido a partir de la frecuencia de corte estipulada. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 32. La línea discontinua roja demarca la frecuencia de corte de la cámara anecoica. Se puede observar que 2,5 cm de espacio de aire anterior a las cuñas son suficientes para obtener resultados de absorción sonora cercanos al 100%. Sin espacio de aire la absorción del sonido decae y con espacios mayores la absorción del sonido es similar, esto a partir de la frecuencia de corte de la cámara.

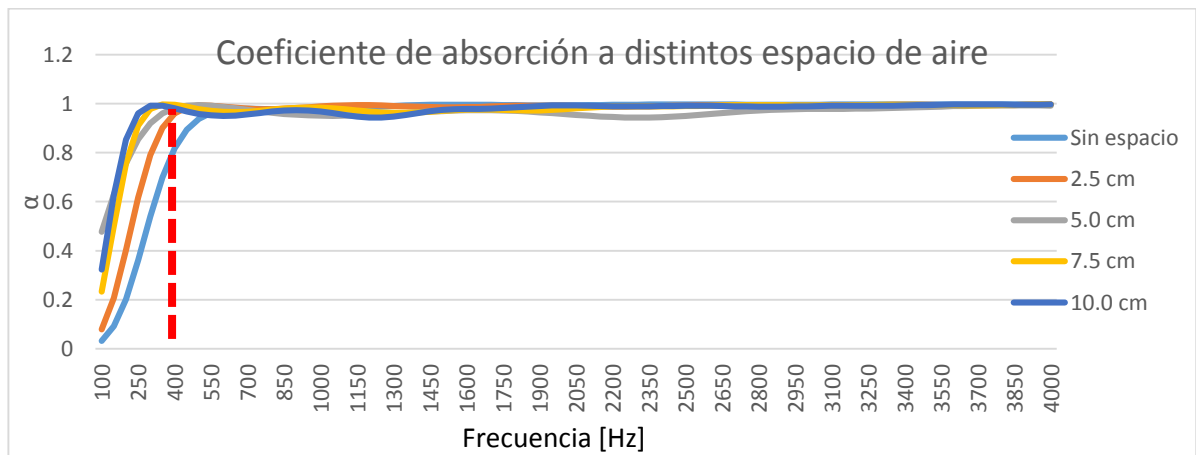


Figura 32. Resultados del modelo en Comsol de incidencia de la variación del espacio de aire anterior a las cuñas anecoicas en la absorción de las mismas.

El alto de la base de la cuña está sujeto al valor del ángulo θ , el cual se definió como 28° . Ángulos menores aumentan el número de cuñas a manufacturar y por ende los costos del proyecto. Ángulos mayores hacen que el área de absorción total disminuya significativamente. Por lo tanto el alto de la base es igual a 8 cm. La longitud de d , que es la profundidad de la cuña respecto a su perfil se selecciona como 8 cm.

Con el fin de observar la presión sonora reflejada en las cuñas, se realizó un modelo en Comsol con un arreglo de cuñas anecoicas con las dimensiones definidas anteriormente. El resultado se puede observar en la figura 33, donde los niveles de presión sonora reflejada en las cuñas son cercanos a cero. El resultado se da a la frecuencia de corte, ya que a frecuencias mayores la absorción del sonido en el material aumenta. Con los resultados obtenidos quedan definidas las dimensiones de la cuña anecoica a implementar en la construcción de la cámara anecoica, estas se pueden apreciar en la figura 34.

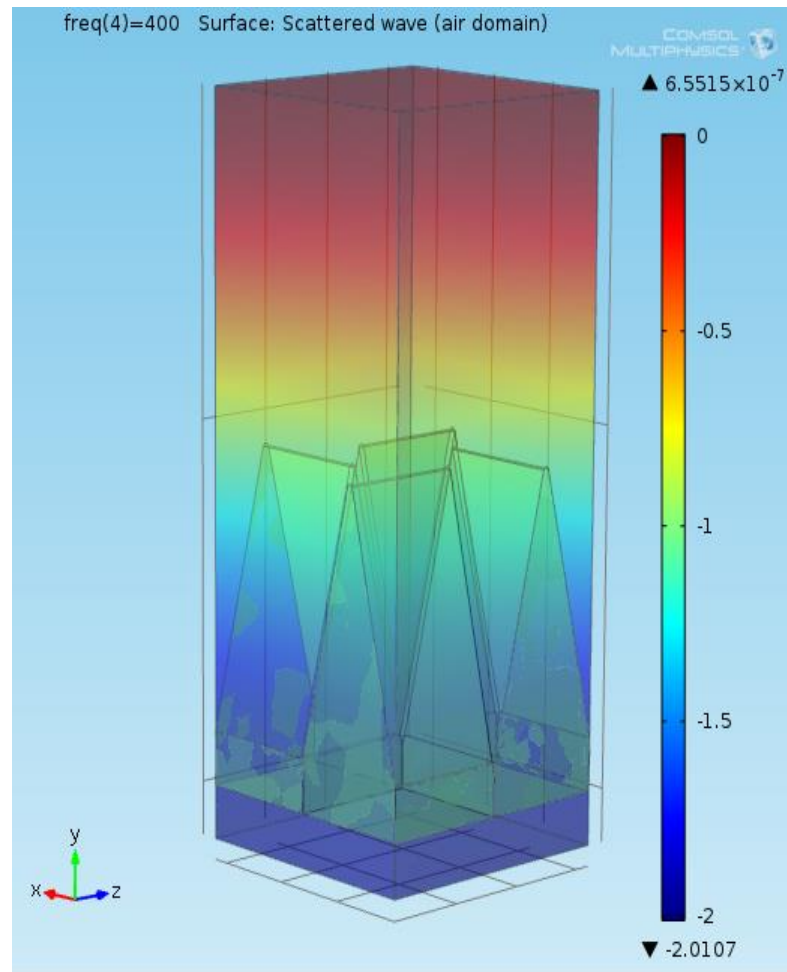


Figura 33. Resultado del modelo en Comsol de la presión sonora reflejada en arreglo de cuñas anecoicas propuesto.

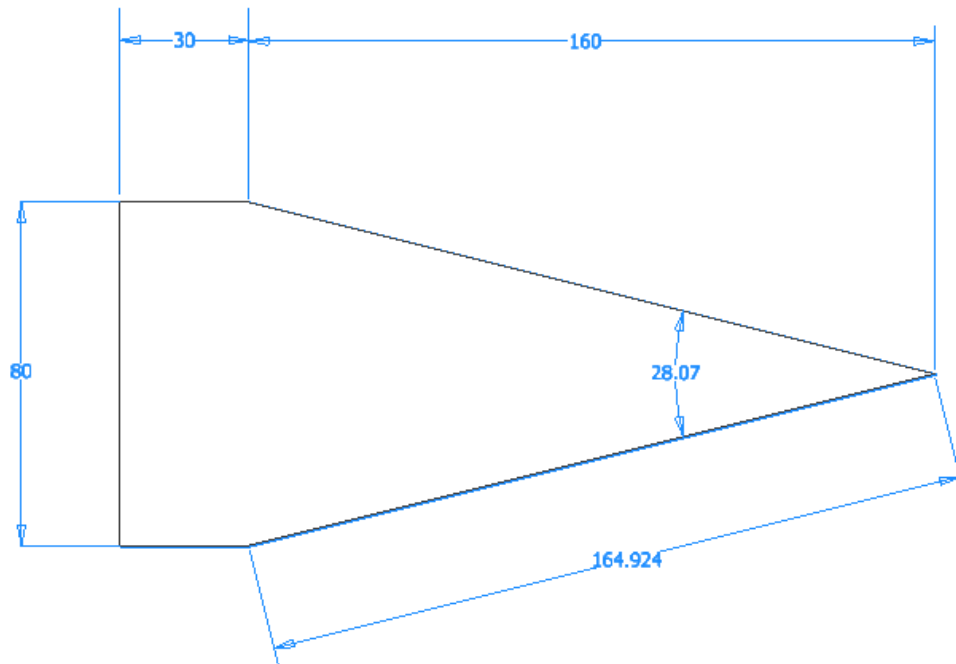


Figura 304. Dimensiones finales en mm de las cuñas anecoicas de la cámara anecoica LaVA – Univalle.

4.4. Cálculo del tiempo de reverberación

El cálculo del tiempo de reverberación se llevó a cabo usando las ecuaciones propuestas por Sabine (ecuación 10), Fitzroy (ecuación 12) y la propuesta para recintos pequeños (ecuación 16), teniendo en cuenta el resultado del coeficiente de absorción de la espuma de poliuretano D40 y las dimensiones de la cámara anecoica. Los resultados se muestran a continuación.

$$TR \text{ (Sabine)} = 0,0138 \text{ s}$$

$$TR \text{ (Fitzroy)} = 0,00307 \text{ s}$$

$$TR \text{ (Cámaras pequeñas)} = 0,0188 \text{ s}$$

Se espera que en el mediano plazo el Laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Universidad del Valle cuente con los equipos exigidos por norma para llevar a cabo la medición del tiempo de reverberación en la cámara anecoica, con el fin de constatar los resultados teóricos obtenidos.

4.5. Presupuesto

En el presupuesto no se incluye el costo del diseño ni el valor de la mano de obra, solo el valor de los materiales e insumos usados en la construcción de la cámara anecoica. La tabla 15 muestra el presupuesto de los materiales empleados en la construcción de la cámara anecoica, se puede observar que el valor de los materiales no excedió al máximo exigido.

Tabla 15. Materiales de construcción para la cámara anecoica del LaVA – Univalle.

PRODUCTO	CANTIDAD	V/UNITARIO	V/TOTAL
Rollo de frescasa marca fiberglass de 2 1/2 espesor 1,20 x 7,5 metros	8	\$ 53.800	\$ 430.400
Tubo cuadrado (6cm x 6cm x 6m) - Espesor 2,5mm	10	\$ 89.500	\$ 895.000
Madera (1" x 2,5" x 3,0m) - Pino Cepillado	60	\$ 12.100	\$ 726.000
Pads de Neopreno (6x6x3 cm ³)	20	\$ 11.500	\$ 230.000
Malla mesh (1,8m x 1,8m) - Calibre 3 mm - Espaciado 1"	1	\$ 563.500	\$ 563.500
Placa ceramic base (2,44m x 1,22m) - Espesor 8mm - 35,82KG	13	\$ 49.800	\$ 647.400
Tablero 9,5mm 122cm x 244cm osb plus	12	\$ 59.900	\$ 718.800
Tornillo negro para lámina de 1 y 1/2 pulg no. 6	200	\$ 100	\$ 20.000
Pegatex - pegante atex	10	\$ 6.000	\$ 60.000
Bolsa x 5 kilos soldadura E6013 de 3/32 marca west arco	2	\$ 45.500	\$ 91.000
Silicona - Pegatex 300ml	20	\$ 6.896	\$ 137.920
Varillas lisas de 1/2 X 6 metros	3	\$ 16.100	\$ 48.300
Medio galón de anticorrosivo	1	\$ 2.000	\$ 2.000
Espuma de poliuretano densidad 40 Kg/m ³	8	\$ 572.500	\$ 4.580.000
		Subtotal	\$ 9.150.320
		Iva 16%	\$ 1.464.051
		Total	\$ 10.614.371

4.6. Construcción de la Cámara Anecoica.

Con los planos de diseño listos (ver Anexo 1) se comenzó con el proceso constructivo, el cual requirió de 800 horas hombre de trabajo, durante un periodo de cinco meses. La construcción de la cámara se hizo en sitio, ya que el tamaño de la estructura no hacía posible su entrada luego del ensamblaje. Las etapas del proceso de construcción pueden observarse en la figura 35, en general son cuatro: construcción de la estructura de soporte, ensamble de las placas externas (fibrocemento), ensamble de las placas internas y relleno de la pared doble (OSB + fiberglass) y la etapa de ensamble de las cuñas anecoicas. El trabajo inició con el proceso de corte, pintura, relleno y soldadura de la estructura de soporte. El relleno de los tubos se hizo con los sobrantes de espuma, esto con el fin de evitar resonancias al interior de sus cavidades. Los tubos se pintaron con una base de anticorrosivo con el fin de evitar problemas de corrosión futuros que pudieran afectar la integridad estructural de esta construcción.

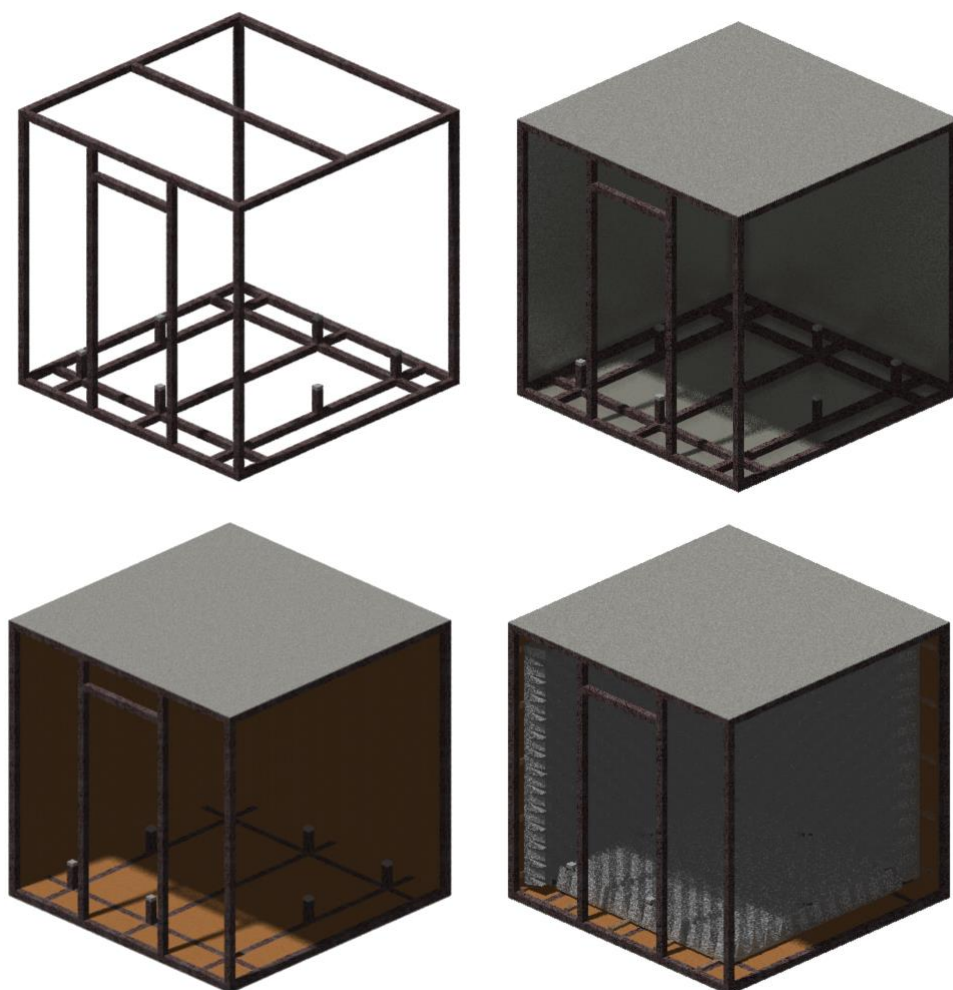
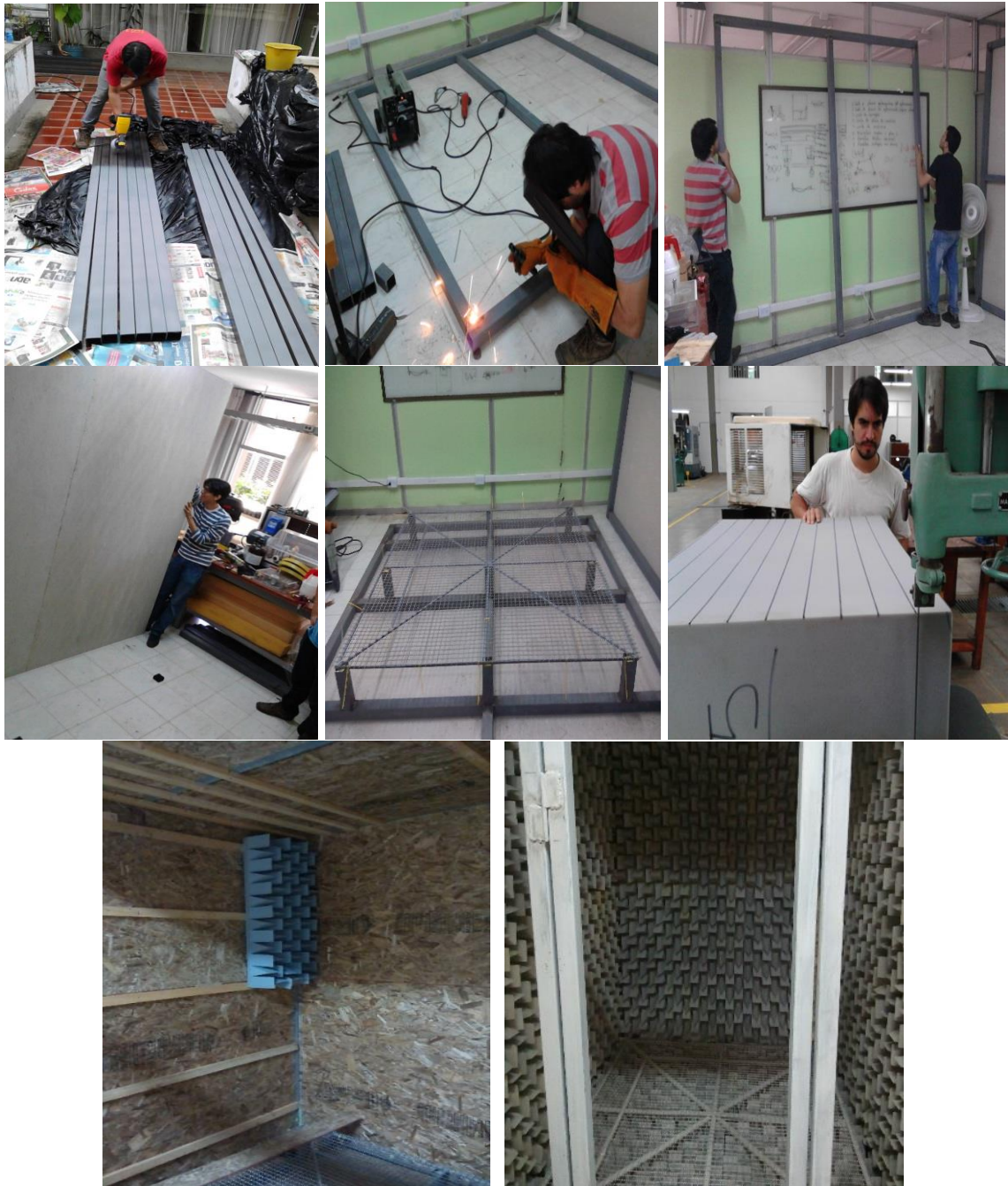


Figura 315. Representación de las etapas del proceso construcción de la cámara anecoica del LaVa-Univalle.

El corte de los tubos se llevó a cabo en una máquina tronzadora. En el corte del material se gastaron tres discos abrasivos. Para el proceso de soldadura se usó un equipo de soldadura de arco con electrodo revestido, el electrodo usado fue el E6013, electrodo recomendado para usos en aceros de bajo y medio carbono. Para llevar a cabo la construcción se tuvo en cuenta el uso de elementos de seguridad según el tipo de actividad desarrollada, tales como gafas, tapabocas, equipo de protección para soldadura, tapa oídos, etc. Una vez soldados los marcos del piso y techo se ensamblaron en ellos las placas de fibrocemento por medio de tornillos de ensamble que se fijaron en agujeros hechos en los tubos. Antes de ubicar la estructura del piso con placas externas de fibrocemento se ubicaron 16 pads de neopreno con dimensiones de 6 cm x 6cm x 3cm de espesor uniformemente espaciados en el piso. Posteriormente se soldaron las columnas que soportarían el techo y se ensambló el mismo, a continuación se ensamblaron las placas de fibrocemento de las paredes laterales externas. Con las paredes externas de la cámara anecoica listas se procedió a ensamblar las paredes internas de madera aglomerada con el relleno de fibra de vidrio. Para sellar las ranuras entre placas y su asentamiento con los tubos se usó silicona, la cual además de sellar es elástica, propiedad que permite obstruir el paso de vibraciones entre los elementos de

construcción. Las cuñas anecoicas se cortaron en una sierra sin fin y su pegado se realizó con un adhesivo epóxico recomendado para este tipo de propósitos. El total de cuñas fabricadas fue de 3453 cuñas. Para ensamblar la puerta se usó un marco en tubos del mismo material empleado en la estructura y se le dio el mismo tratamiento de pared doble con material absorbente en medio.

Algunas imágenes del proceso constructivo se pueden observar a continuación.



4. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CÁMARA ANECOICA

El proceso de evaluación se hizo usando los equipos disponibles en el laboratorio, evaluando la desviación de la ley del inverso cuadrado en una diagonal de la cámara. Las pruebas se realizaron según la metodología expuesta en la sección de Materiales y Métodos. La norma ISO 3745 propone que para llevar a cabo la evaluación de la ley del inverso cuadrado debe asegurarse que el ruido de fondo esté 10 dB por debajo de la señal evaluada para cada banda de tercio de octava, por lo tanto se realizó la evaluación del ruido de fondo respecto del ruido rosa (figura 37). Los resultados muestran que este lineamiento se cumple para todas las bandas de tercio de octava, excepto para la centrada en 100 Hz, esto no es significativo, ya que el análisis de la cámara anecoica se realiza para frecuencias mayores a 400 Hz, que es la frecuencia de corte de la cámara.

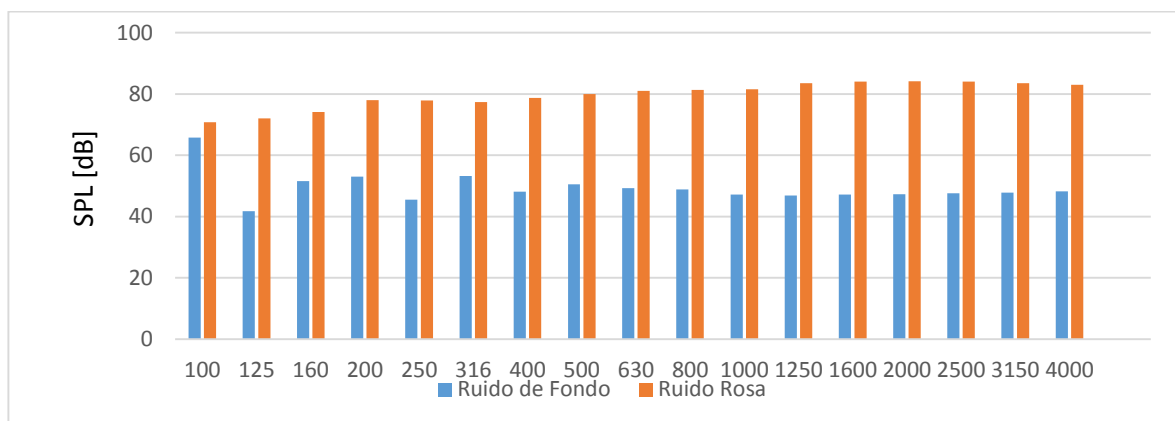


Figura 32. Comparativo del ruido de fondo respecto del Ruido Rosa empleado.

Una vez se garantizó que el ruido de fondo se encuentra por debajo de los 10 dB se procedió a determinar experimentalmente la desviación de la ley del inverso cuadrado. La tabla 16 presenta los resultados de desviaciones de la ley del inverso cuadrado medidas en la cámara anecoica para cada banda de tercio de octava. La figura 38 muestra gráficamente los valores de desviaciones obtenidos respecto a los valores permitidos por la norma. Los resultados nos dan una idea del comportamiento acústico de la cámara anecoica construida en relación a la ley del inverso cuadrado en la diagonal de prueba. En la tabla 16 pueden observarse los resultados de la desviación de la ley del inverso cuadrados obtenidos experimentalmente para cada punto de medida en la diagonal evaluada y a cada banda de frecuencia de tercio de octava.

Tabla 16. Resultados experimentales de la desviación de la ley del inverso cuadrado en la cámara anecoica del LaVA – Univalle en bandas de tercio de octava en los puntos de medición evaluados.

	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	316 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz
1 m	-3,43	0,90	-3,00	-2,80	3,20	2,57	0,57	0,63	-0,43	0,35	0,04	0,02	0,21	0,17	0,09	0,51	0,51	1,50
1,1 m	-2,70	0,98	-1,73	-2,70	1,24	3,32	1,08	-0,45	0,12	0,48	0,31	-0,01	0,35	0,22	0,13	0,39	0,42	1,22
1,2 m	-1,80	1,14	-0,56	-2,25	-0,22	3,50	1,29	-0,86	0,45	0,15	0,28	0,31	0,31	0,25	0,22	0,41	0,42	0,94
1,3 m	-1,03	0,72	-0,03	-1,41	-1,20	2,37	1,14	-0,28	0,24	0,11	0,24	0,18	0,31	0,23	0,21	0,33	0,33	0,65
1,4 m	-0,06	0,66	0,10	-0,37	-1,52	0,78	0,91	1,05	-0,53	0,64	0,09	0,13	0,30	0,25	0,22	0,30	0,29	0,48
1,5 m	0,66	0,84	-0,21	-0,12	-1,71	-0,36	0,40	1,34	-1,04	0,55	0,05	0,13	0,02	0,02	-0,01	0,02	0,03	0,09
1,6 m	0,53	-0,52	-0,40	0,18	-1,76	-1,43	-0,27	1,51	-1,31	0,13	-0,29	-0,17	-0,31	-0,25	-0,33	-0,28	-0,28	-0,33
1,7 m	1,50	0,03	-0,12	1,02	-0,72	-2,32	-1,00	0,84	-0,34	-0,38	0,05	-0,36	-0,26	-0,15	-0,14	-0,24	-0,22	-0,51
1,8 m	1,02	-0,27	0,34	1,31	1,01	-2,51	-1,33	-0,99	0,95	-0,77	-0,23	-0,21	-0,14	-0,22	-0,08	-0,24	-0,25	-0,65
1,9 m	-0,89	-2,65	1,02	0,98	3,21	-1,96	-1,14	-2,53	0,88	-0,43	-0,22	0,14	-0,22	-0,07	-0,03	-0,22	-0,26	-0,75

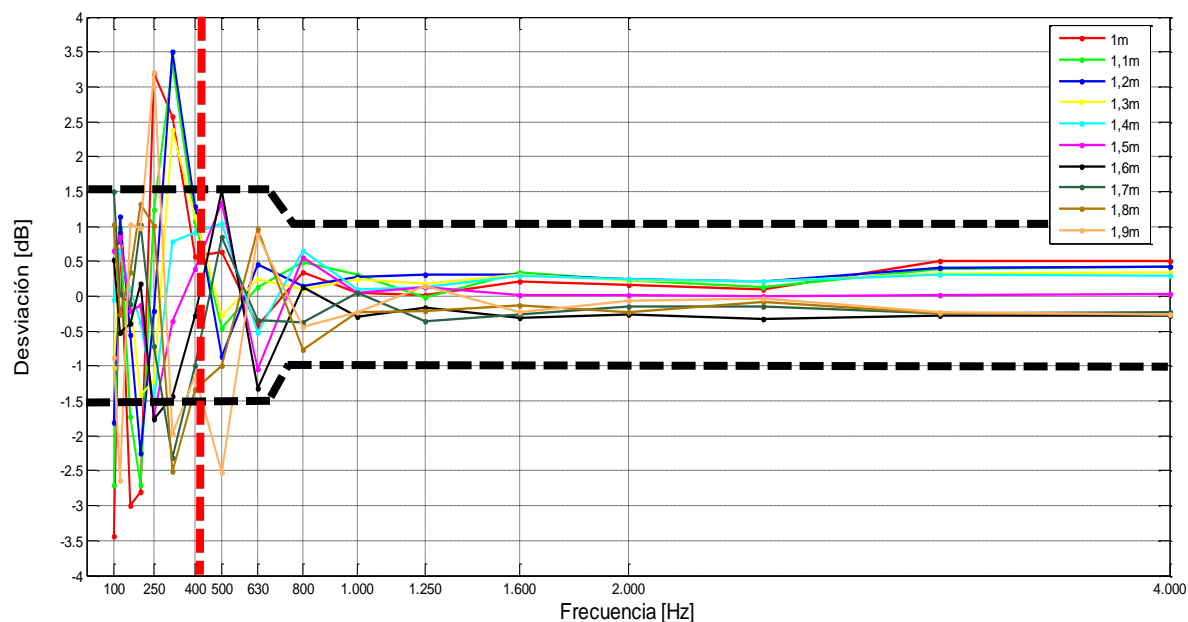
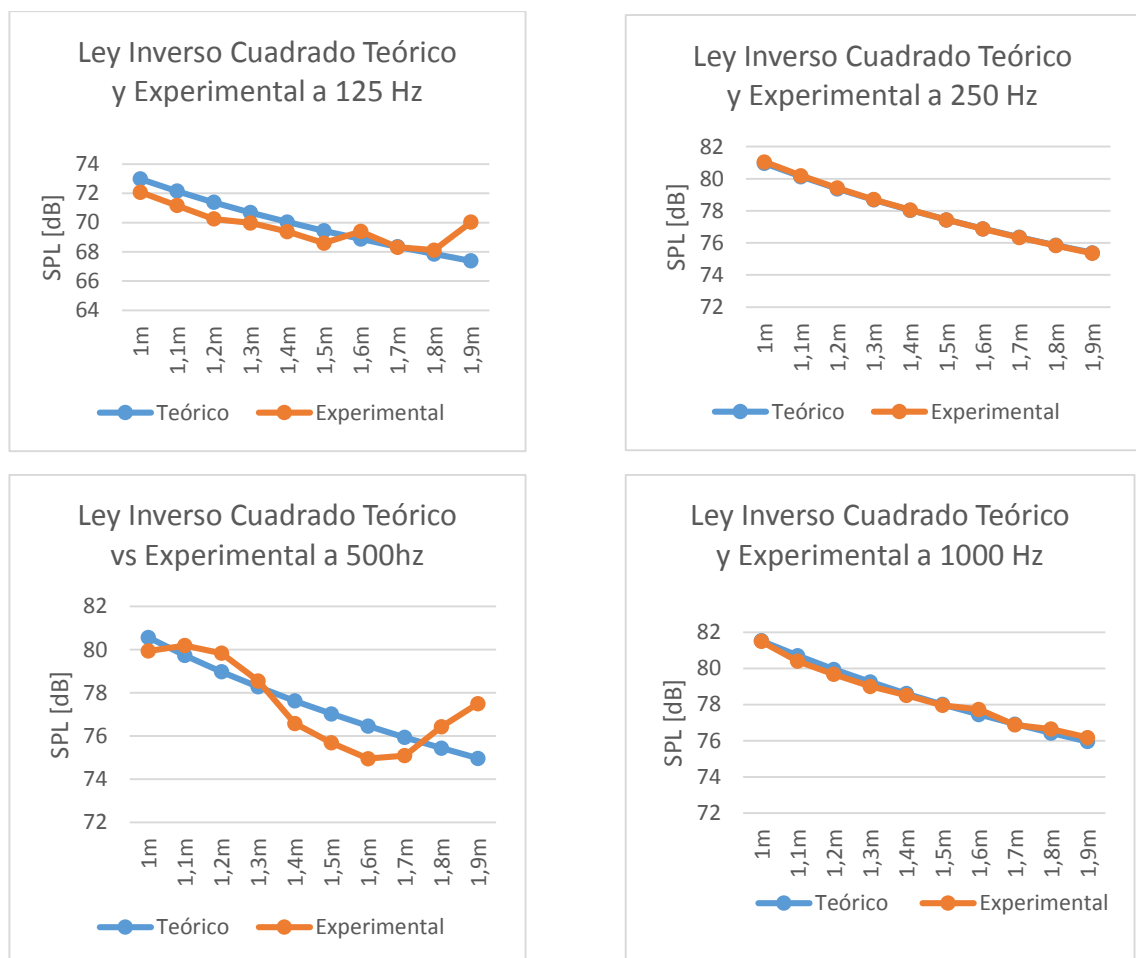


Figura 33. Desviación de la ley del inverso cuadrado en la cámara anecoica del LaVA – Univalle.

En la figura 33 se muestran dos líneas negras de trazos discontinuos que acotan las desviaciones máximas de la ley del inverso cuadrado estipuladas por la norma ISO 3745, se puede observar que la ley se cumple en todo el rango de frecuencias a partir de la frecuencia de corte (línea roja de trazos discontinuos) excepto para la medida de 500 Hz a 1,9 m de la fuente.

La figura 34 condensa los resultados de la ley inverso cuadrado teóricos comparados con su respectivo resultado experimental para bandas de tercio de octavas centradas en 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz. En los gráficos se puede observar la caída del SPL conforme se aleja de la fuente sonora, donde la caída de SPL experimental se ajusta en gran medida a la teórica en las bandas de frecuencias que se presentan.

En las figuras de la 35 a la 41 se muestran los resultados experimentales de la desviación de la ley inverso cuadrado respecto de la distancia de la fuente para las frecuencias de bandas de tercio de octava centradas en 125 Hz, 250 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz y 4000 Hz. En estas figuras las líneas discontinuas negras demarcan los límites máximos admisibles de desviación de la ley del inverso cuadrado permitidos por la norma ISO 3745, se puede observar que la ley del inverso cuadrado se cumple, lo que significa que la cámara provee condiciones de espacio al aire libre que es el objetivo principal de esta. Se espera que en el mediano plazo el LaVA cuente con los equipos necesarios exigidos por la norma ISO 3745 para llevar a cabo la calificación de la cámara anecoica cumpliendo todos los lineamientos de la norma.



Continúa.

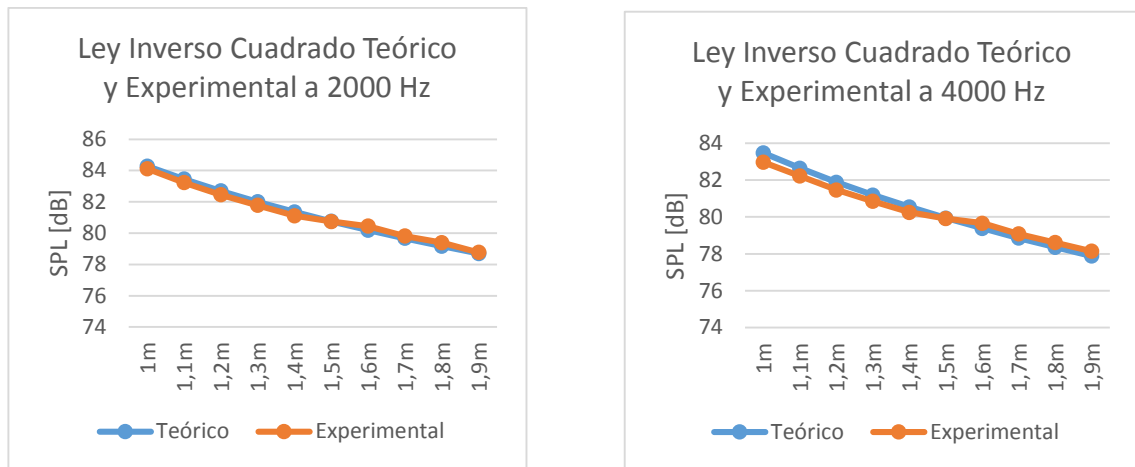


Figura 34. Resultados de la Ley del Inverso Cuadrado teórico y experimental para bandas de frecuencia de tercio de octavas centradas en 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz.

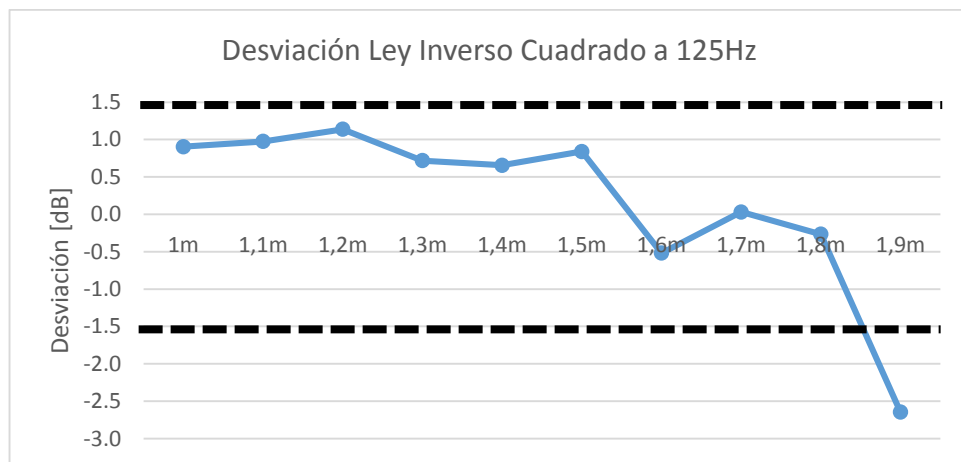


Figura 35. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 125 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.

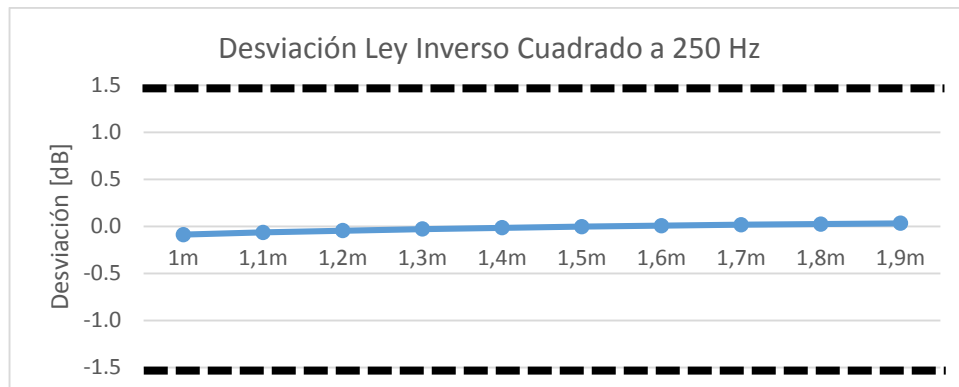


Figura 36. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 250 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.

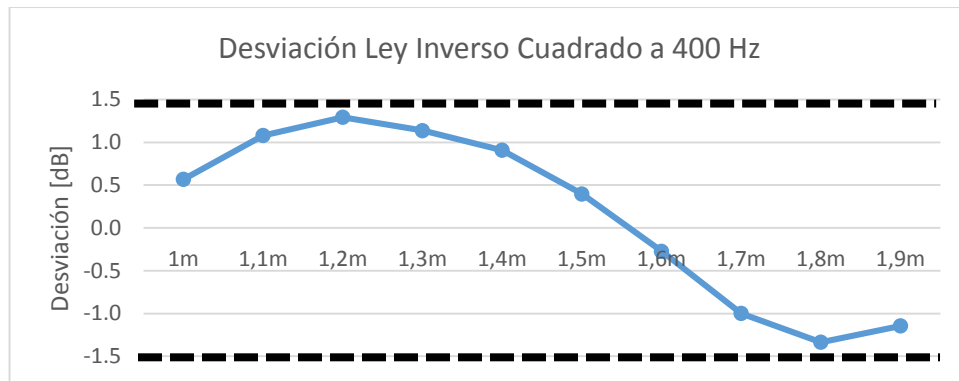


Figura 37. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 400 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.

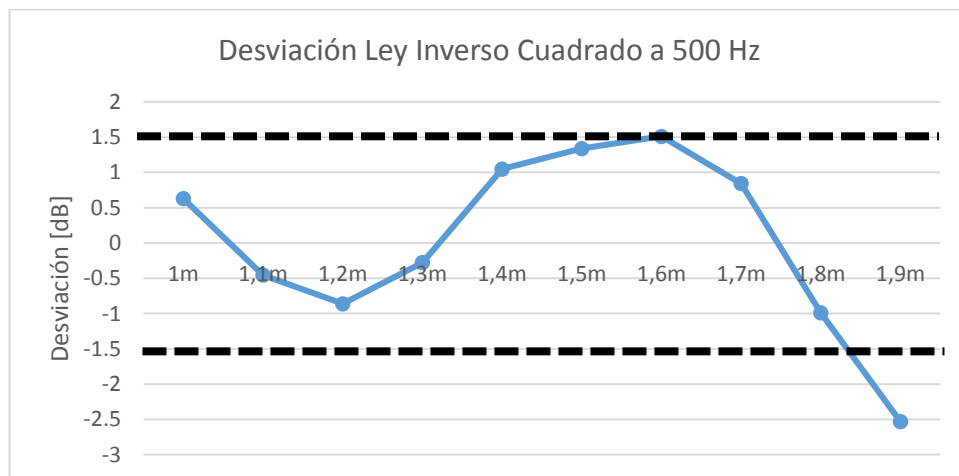


Figura 38. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 500 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.

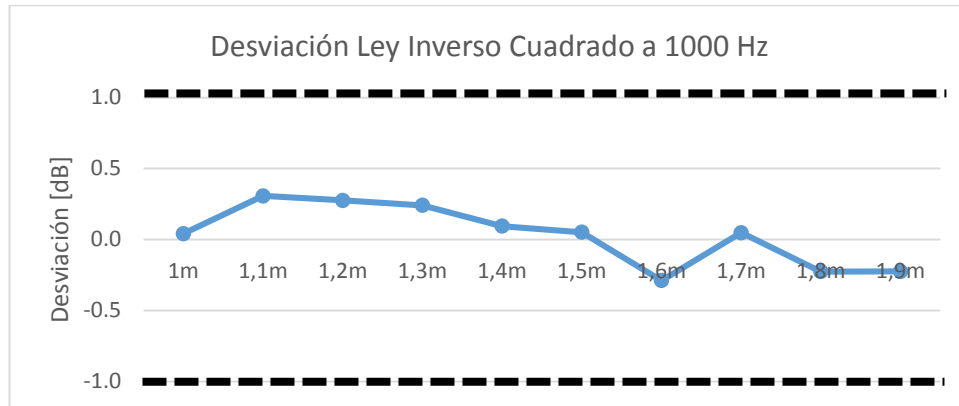


Figura 39. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 1000 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.

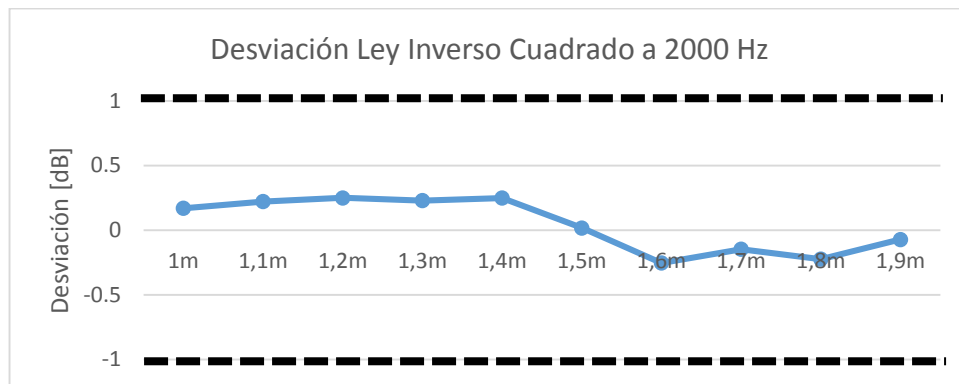


Figura 40. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 125 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.

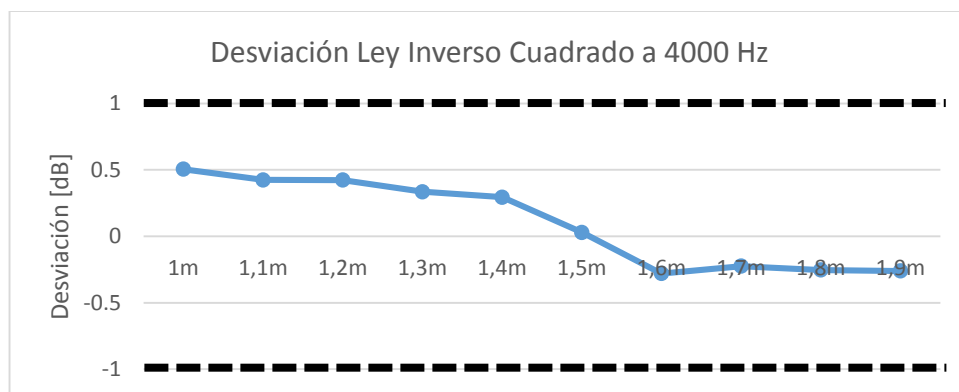


Figura 41. Desviación de la ley del inverso cuadrado experimental en banda de tercio de octava a 4000 Hz, en relación a los distintos puntos de medición.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

- Las espumas de poliuretano de celda abierta, que se producen en la industria local empleadas comúnmente para la producción de colchones y sillas, poseen buenas propiedades acústicas de absorción del sonido.
- El método de evaluación usado en la cámara anecoica mostró que la ley del inverso cuadrado se cumple en todas las frecuencias y puntos de medida evaluados excepto en la posición de 1,9 m de la fuente a 500 Hz, esto a partir de la frecuencia de corte de la cámara anecoica. Se sugiere como trabajo futuro realizar nuevas medidas en otras cuatro trayectorias diferentes según lo estipula la norma ISO 3745.
- El método de evaluación nos permite saber el comportamiento de la cámara anecoica en relación a la desviación de la ley del inverso cuadrado en una dirección, dirección en la que se propone ubicar las fuentes a evaluar, lo anterior mientras puede llevarse a cabo una evaluación bajo el rigor de la norma ISO 3745.
- A pesar de que la cámara anecoica no cuenta con una cámara externa de aislamiento, como es lo aconsejable (box in box), presenta un ruido de fondo aceptable para llevar a cabo la prueba de calificación como lo recomienda la norma ISO 3745.
- Con el desarrollo de la cámara anecoica se ha adquirido el conocimiento suficiente para la construcción de una cámara de mayor escala, además de haber podido identificar potenciales materiales para aislamiento y absorción acústica en el mercado local. Los resultados obtenidos en este trabajo son el primer paso para el diseño y la construcción de una cámara anecoica para la evaluación acústica de vehículos y fuentes de ruido de gran tamaño.
- A pesar del buen desempeño que mostraron las espumas de poliuretano, estas no están diseñadas como material para aislamiento acústico. En general en el mercado local no hay muchos materiales diseñados para aislamiento acústico por lo cual es muy difícil obtener datos de las propiedades acústicas de los materiales disponibles en el mercado local. Debido a lo anterior, se propone como trabajo futuro el desarrollo de tecnologías que permitan evaluar las características acústicas de los materiales locales tales como el coeficiente de absorción sonora, la resistencia al flujo y de tortuosidad.
- Se recomienda la adquisición de fuentes omnidireccionales calibradas para mejorar los resultados obtenidos en la calificación de la cámara anecoica construida siguiendo los lineamientos de la Norma ISO 3745. Además como trabajo futuro se debe realizar la prueba de tiempo de reverberación y cuantificar que tanto aísla las vibraciones externas la estructura de la cámara anecoica.
- Se recomienda realizar la prueba de tiempo de reverberación en la cámara anecoica del LaVA bajo la norma UNE – EN ISO 3382 – 2.
- Se recomienda realizar pruebas del aislamiento a vibraciones del sistema construido.

Bibliografía

Beranek, L. L. (1954). *Acustics*. United States: McGraw Hill.

Piedrahita, Y., & Fajardo, F. (2012). Construcción de una cámara anecoica para la caracterización de la pérdida de transmisión sonora. *Revista Brasileira de Ensino de Física-Vol 34*.

Beranek, L., & Sleeper, H. (1946). *The Design and Construction of Anechoic Sound Chambers*.

Brüel Acoustics. (n.d.). *www.bruel-ac.com*. From <http://www.bruel-ac.com/tr/pi9701/PI9701.html>

Gomez Alfageme, J., Sánchez Bote, J., & Blanco Martín, E. (n.d.). *New measurement methods for anechoic chamber characterization*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Leeudomwongs, S., Juntarapaso, Y., Kongthavorn, P., Thongboon, A., & Plangsaengmas, V. (13 de Julio de 2013). • Design and qualification testing of a miniature anechoic chamber for the calibration of small medical devices. Bangkok, Thailand: ICSV 20.

García Luque, R. A., & Quinatana Soler, R. A. (2007). *Diseño de una cámara anecoica con aplicación para trabajo acústico*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Univesidad San Buenaventura.

Flores Jimenez, J., & Villanueva Almaraz, A. (2010). *Mini Camara Anecoica*. Mexico: Instituto Politecnico Nacional.

Redonda Fernández, M. (2013). *Acústica aplicada a la edificación*. Universidade da Coruña.

Sancho Vendrell, F. J., Llinares Galiana, J., & Llopis Reyna, A. (2008). *Acústica arquitectónica y urbanística*. México: Limusa.

Recuero López, M. (2001). *Acondicionamiento Acústico*. Madrid: Paraninfo - Thomson Learning.

Lehmann Fernandez, C. (Abril de 2007). *Revisión de los algoritmos de predicción del aislamiento acústico proporcionado por paredes dobles: un análisis comparativo*. Chile: Universidad Austral de Chile.

Sabine, W. C. (1922). *Collected papers on acoustics*. London: Cambridge Harvard University Press.

Alton Everest, F., & Pohlmann, K. C. (2009). *Master Handbook of Acoustics*. McGraw-Hill.

Bosci, C. E. (2008). *MÉTODO PARA MEDIR EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN EN RECINTOS. Proyecto leonardo -Vol 3*.

García Rodríguez, J. (2010). *Design and implementation aspects of a small anechoic room and sound-actuation system*. Navarra, España: Universidad pública de Navarra.

Cabrera Ortiz, J. (2010). *Acustica y fundamentos de sonido*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. (8 de 5 de 2014). *hyperphysics.phy-astr.gsu.edu*. Retrieved 2014 from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/forces/isq.html#isq>

Bruel. (Abril de 2003). <http://www.bruel-ac.com/tr/tr9602/tr9602.html>.

Eckel, A. (19 de Agosto de 2002). DESIGN AND CONSTRUCTION CONSIDERATIONS FOR AUTOMOTIVE AND AUTOMOTIVE COMPONENT ACOUSTIC TEST FACILITIES. Miami, USA: Inter-noise 2002.

Carrion Isbert, A. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Barcelona: Ediciones UPC.

Joshi, M., Shravage, P., Jain, S., & Karanth, S. (2011). A Comparative Study on Flow Resistivity for Different Polyurethane Foam Samples. *Journal of Acustical Society of India Vol 38*.

Castillo, J., & Costa, A. (Mayo de 2012). CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE MATERIALES ABSORBENTES SONOROS POROSOS. Córdoba, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC).

Allard, J. F., Castagnede, B., Henry, M., & Lauriks, W. (1994). Evaluation of tortuosity in acoustic porous materials saturated by air. *Rev. Sci. Instrum. 65 - American Institute of Physics*.

ISO. (2003). *INTERNATIONAL STANDARD ISO 3745*. Suiza: ISO.

Beranek, L. L. (1954). *Acústica*. Buenos Aires: McGraw-Hill.

Correa, P. (17 de 07 de 2008). <http://www.elespectador.com/>. Retrieved 25 de 09 de 2013 from <http://www.elespectador.com/impreso/vivir/articuloimpreso-jaula-de-los-sonidos>

UNAD. (n.d.). <http://datateca.unad.edu.co/>. From http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208042/Contenido_en_linea/leccin_19__ruido_rosa_ruido_marrn_y_ruido_blanco.html

ISO. (2003). *Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure — Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms*. Suiza: ISO.

Michigan Technological University. (Abril de 2005). Design and Analysis of a Hemi-Anechoic Chamber. Michigan.

Universidad Ramon Llull. (2011). <http://www.salleurl.edu/>. Retrieved 25 de 09 de 2013 from http://www.salleurl.edu/files/281-2484-IMG/foto_Acustica.jpg

El País. (24 de Junio de 2011). www.elpais.com.co. Retrieved 03 de 2013 de 2012 from <http://www.elpais.com.co/elpais/cali/cierran-nueve-minas-ilegales-carbon-en-zona-rural-cali>

University of Southampton. (n.d.). www.isvr.co.uk. Retrieved 2014 de 05 de 16 from http://www.isvr.co.uk/faciliti/lg_anech.htm

Universitata Degli Studi di Ferrara. (n.d.). www.unife.it. Retrieved 16 de 05 de 2014 from <http://www.unife.it/tecnopolo/lav/camera-anechoica-e-semianechoica>

Barrionuevo, D., & González, J. (2012). Criterios generales para el diseño de cámaras anecoicas. Córdoba, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional - Facultad regional Córdoba.

Durá Domenech, A. (2005). *Temas de acústica*. Alicante: Publicaciones de la Universidad de Alicante.

Koidan, W., & Hruska, G. (Agosto de 1978). National Boreau of Standards anechoic chamber. Washington, Estados Unidos: Acoustical Society of America.

León Rodríguez, Á. L. (1998). La acústica de los teatros a través de la historia". *Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (p. 271). 1998: CEHOPU.

- LLinares, J., Llopis, A., & Sancho, J. (2008). *Acústica Arquitectónica y Urbanística*. México: Limusa.
- López Campos, M., Brito Florez, P., & Saenz Enderica, F. (n.d.). Implementación de una cámara anecoica en la banda de 2 - 3 GHz. Quito, Ecuador: ESPE.
- Moser, M., & Barros, J. L. (2009). *Ingeniería Acústica - Teoría y aplicaciones*. Berlín: Springer.
- Moser, M., & Barros, J. L. (2009). *Ingeniería Acústica*. Berlin: Springer.
- Raichel, D. (2006). *The science and applications of acoustics*. New York: Springer.
- Ressl, M., & Wundes, P. (n.d.). Design of an Acoustic Anechoic Chamber for Application in Hearing Aid Research. Buenos Aires, Argentina: RECENT ADVANCES in ACOUSTICS & MUSIC.
- Sun, D., Cgrag, J., van Shaik, A., & Cabrera, D. (2009). The Design and Evaluation of an economically Constructed Anechoic Chamber. *Architectural Scienie Review* , 312 - 319.
- Velis, A., Giuliano, H., & Méndez, A. (4 de Marzo de 1994). The Anechoic Chamber at the Laboratorio de Actística. Buenos Aires, Argentina: Elsevier.

ANEXO 1: PLANOS DE LA CÁMARA ANECOICA DEL LAVA - UNIVALLE

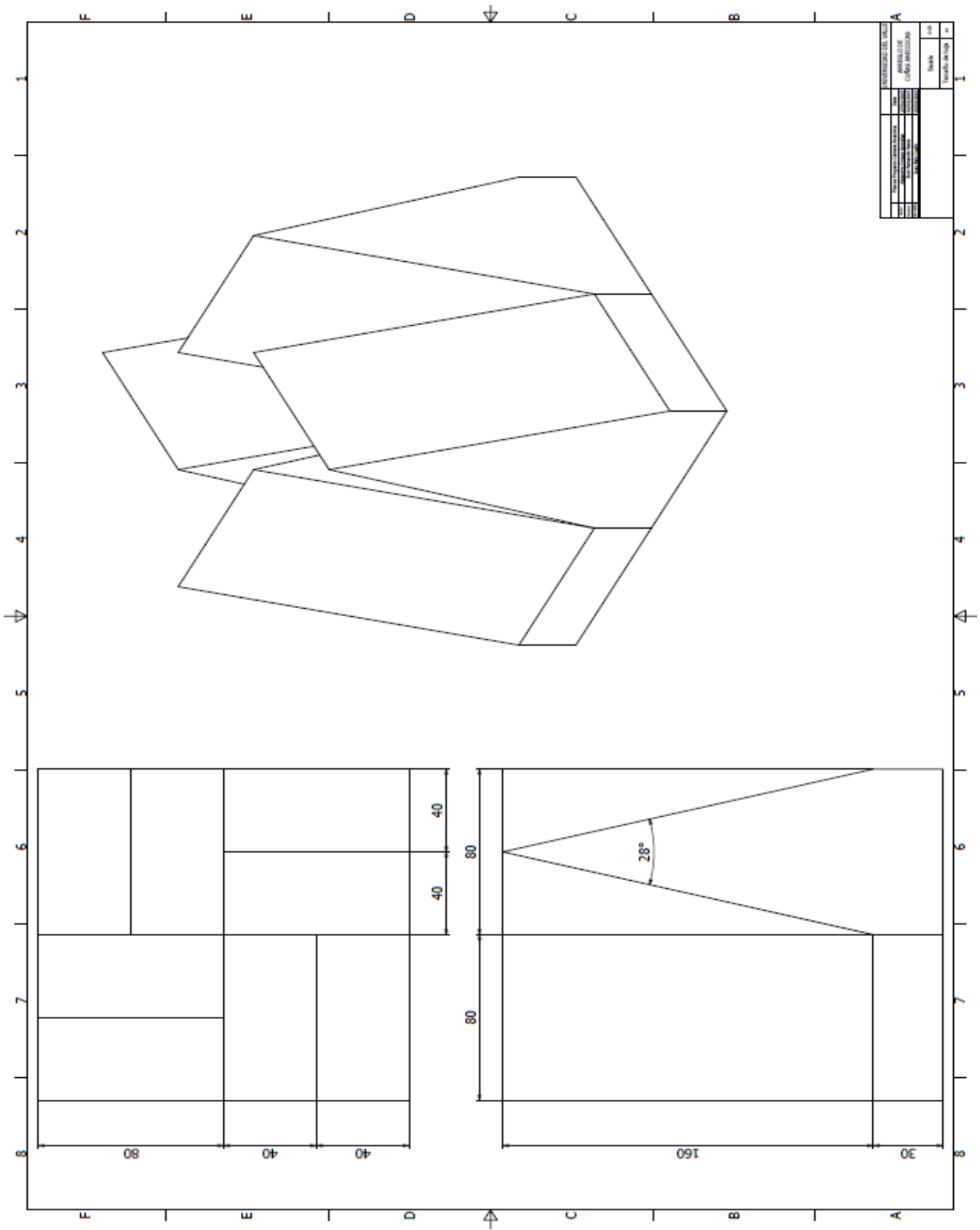


Figura 42. Plano arreglo de cuñas anecoicas.

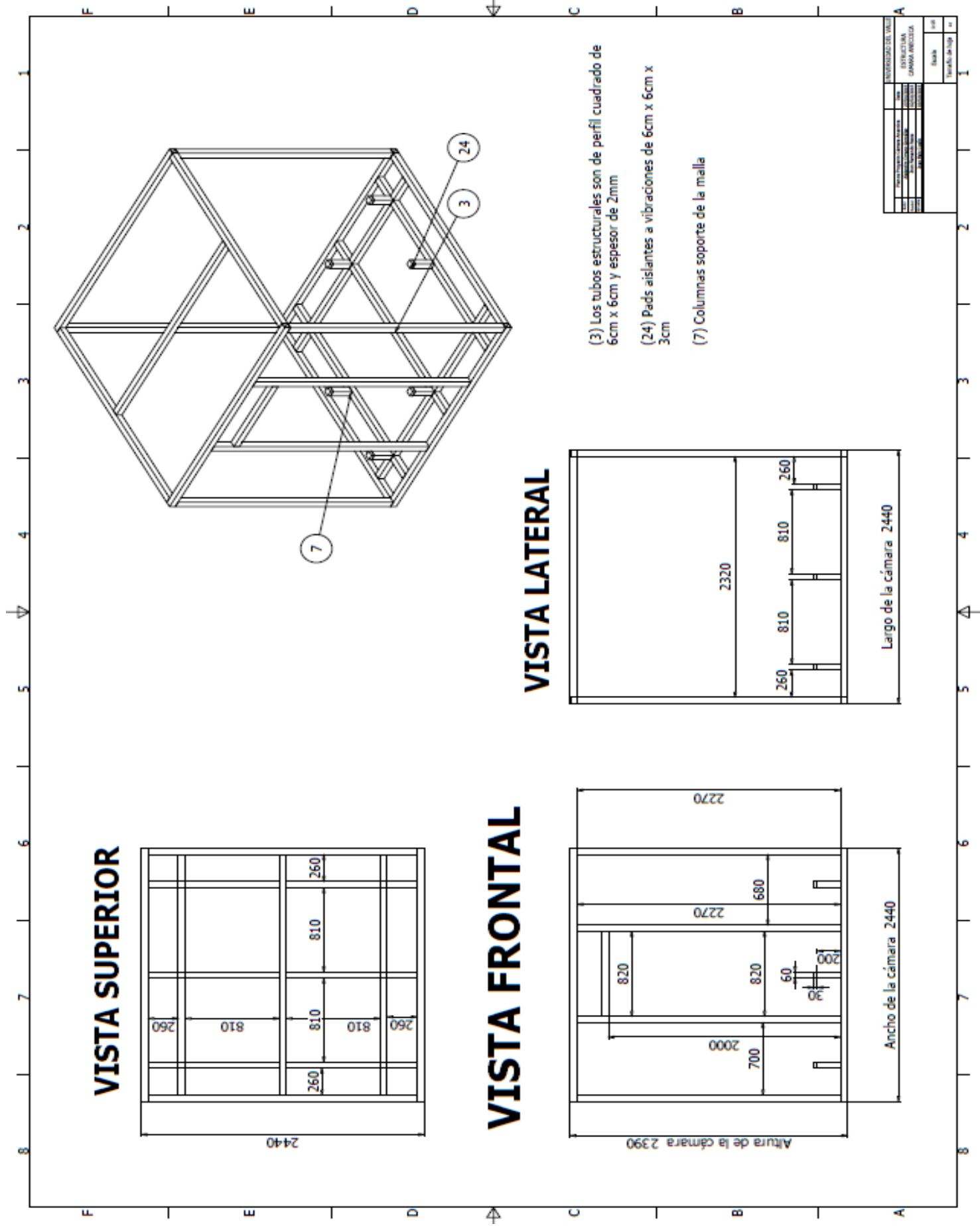


Figura 43. Plano estructura soporte.

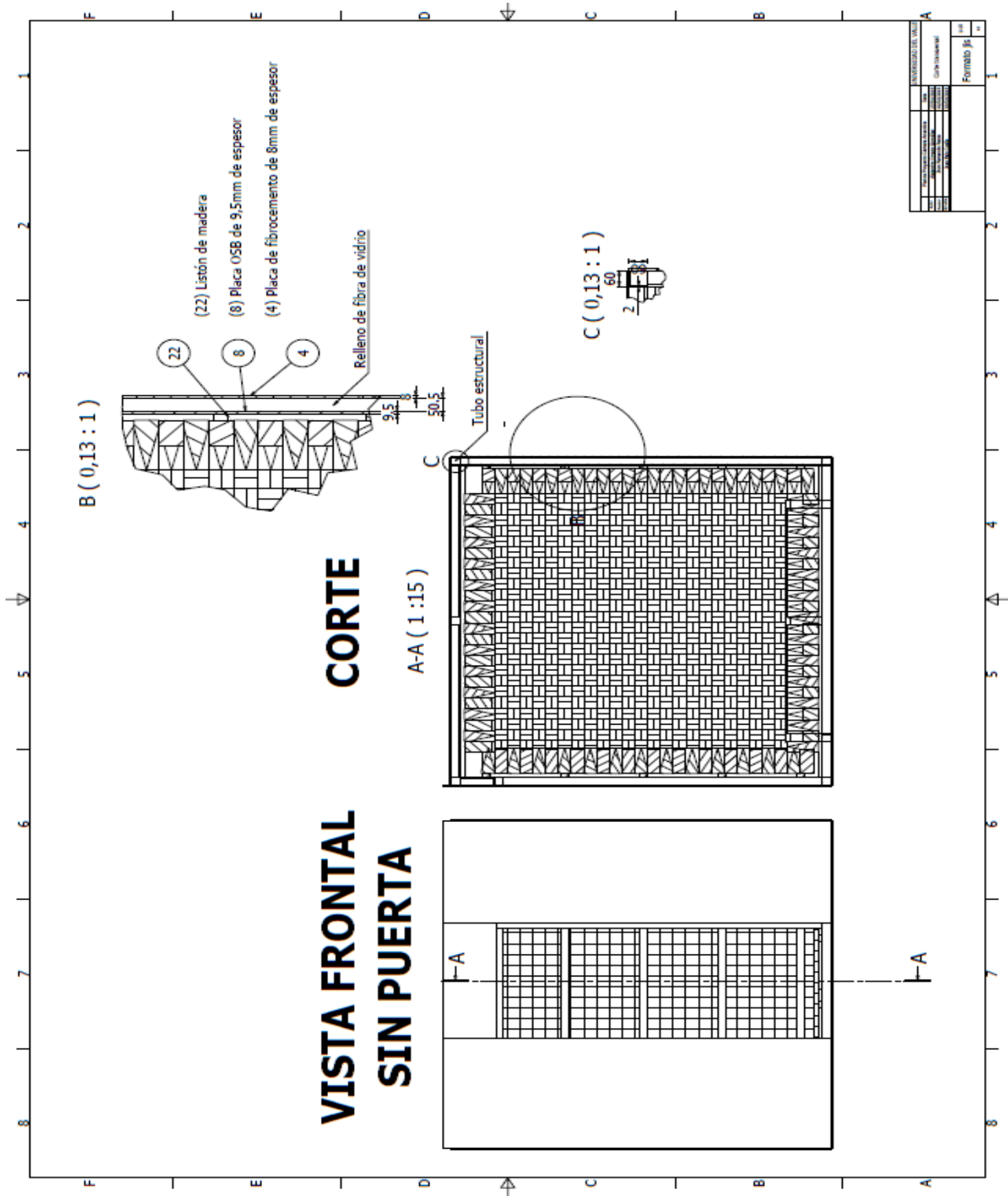


Figura 45. Plano corte transversal de cámara anecoica.

